

文章编号: 0258-7025(2010)12-3050-06

三波长光纤拉曼放大器中的级联受激布里渊散射

刘红林¹ 吴 晗¹ 邹园萍² 张在宣¹

(¹ 中国计量学院光电子技术研究所, 浙江 杭州 310018)
(² 浙江工商大学信息与电子工程学院, 浙江 杭州 310018)

摘要 在背向抽运的光纤拉曼放大器(FRA)中,能够观察到级联的受激布里渊散射(SBS)。在 SBS 实验中,采用最大输出功率为 3000 mW 的三波长光纤拉曼激光器作为拉曼抽运源,25 km 单模光纤(SMF)作为布里渊增益和拉曼增益介质,功率为 3 dBm 的外腔式激光器(ECL)作为布里渊抽运源。在实验中观察到的前、后向级联 SBS 的最高级数分别为 156 条和 89 条,前、后向 SBS 相邻级次光谱之间的频移分别为 11 GHz 和 22 GHz,即它们波长间隔分别为 0.085 nm 和 0.166 nm,光谱带宽分别为 13.580 nm 和 14.812 nm。与前向传输相比,后向输出的平坦性要好。与单波长 FRA 相比,用三波长拉曼激光器作为抽运源更容易得到平坦性好和阶数更多的级联 SBS。

关键词 非线性光学;布里渊散射;拉曼抽运;布里渊级数;增益系数

中图分类号 TN248.1;O437.2 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL20103712.3050

Cascaded Stimulated Brillouin Scattering in Three-Wavelength Fiber Raman Amplifier

Liu Honglin¹ Wu Han¹ Zou Yuanping² Zhang Zaixuan¹

¹ Institute of Optoelectronics Technology, China Institute of Metrology, Hangzhou, Zhejiang 310018, China
² Institute of Information and Electronic Engineering, Zhejiang Industry and Commerce University, Hangzhou, Zhejiang 310018, China

Abstract In backward pumped fiber Raman amplifier (FRA), cascaded stimulated Brillouin scattering (SBS) is observed. In the experiment, a three-wavelength Raman fiber laser whose maximum output is 3000 mW was used as Raman pump, and 25 km single mode fiber (SMF) is used as both Brillouin and Raman gain media, an external cavity laser (ECL) whose power is 3 dBm is used as Brillouin pump. The backward cascaded SBS of 89 orders and forward cascaded SBS of 156 orders are observed. The frequency shifts of the backward and forward SBS between adjacent order are 22 GHz and 11 GHz respectively, namely their wavelength intervals are 0.166 nm and 0.085 nm respectively. The spectral bandwidths of the backward and forward SBS are 14.812 nm and 13.580 nm respectively. The flatness of backward spectral lines is better than that of forward. Compared with single-wavelength FRA, the three-wavelength Raman fiber laser used as Raman pump is easier to generate cascaded SBS.

Key words nonlinear optics; Brillouin scattering; Raman pump; series of Brillouin; gain coefficient

1 引 言

受激拉曼散射(SRS)和受激布里渊散射(SBS)是光纤中常见的两种非线性现象,它们都属于非弹性散射,物理机理也相似,主要区别在于:SRS中参

与的是光学声子,而 SBS 中参与的是声学声子,光纤中 SRS 产生的斯托克斯波可以前后双向传输,而 SBS 产生的斯托克斯波一般仅沿后向传输^[1~3]。SRS 和 SBS 都可以被用来制作光纤激光器和光纤

收稿日期: 2010-04-21; 收到修改稿日期: 2010-07-20

基金项目: 国家 973 计划(2010CB327804)、国家自然科学基金(60608009)和浙江省自然科学基金(Y107091)资助课题。

作者简介: 刘红林(1972—),男,副教授,主要从事光纤放大器和光纤传感器技术等方面的研究。

E-mail: liuhonglin720105@gmail.com

放大器^[4~7]。

在光纤拉曼放大器(FRA)抽运下,由于 SRS 的增益作用,光纤中受激布里渊散射的阈值大大降低,又因为光纤中的双瑞利散射,可以促进受激布里渊散射的放大作用;在 FRA 抽运功率比较大的时候会出现多阶受激布里渊散射光谱,形成级联的受激布里渊散射现象^[8,9],这种级联的受激布里渊散射光可以被利用来制作多波长激光器^[10]。

K. D. Park 等^[11]用色散补偿光纤(DCF)作为增益介质,波长分别为 1465 nm 和 1480 nm 的两个半导体激光器(LD)作为拉曼抽运源和功率为 10 W 的高功率掺镱光纤激光器(YFL)作为放大器的实验中,观察到了级联受激布里渊散射现象,其散射光谱具有平坦系数高(小于 3 dBm)和光谱带宽广(57.2 nm)的特点;运鹏等^[2]用 DCF 作为增益介质和波长为 1450 nm 的 LD 作为拉曼抽运源背向抽运 1550 nm LD 信号源的实验中,观察到了级联受激布里渊散射光谱,由于实验条件所限,无法得到平坦系数高的光谱。本文利用普通单模光纤作为增益介质,三波长拉曼激光器作为抽运源,实验中观察到了

前、后向级联的受激布里渊散射现象。

2 实验装置

实验装置如图 1 所示。该装置由外腔式激光器(ECL)、隔离器(ISO)、环形器(CIR)和 25 km G652 单模光纤(SMF)、三波长拉曼激光器(pump)及抽运耦合器(WDM)组成。其中 ECL 被用作布里渊抽运源,其功率在 -0.5~3 dBm 之间可调,波长为 1545 nm,带宽小于 100 MHz,ECL 光通过隔离器和环形器入射到 25 km 光纤中;长飞光纤光缆有限公司(YOFC)生产的 25 km SMF 被用作拉曼增益和布里渊增益介质;三波长光纤拉曼激光器被用作拉曼抽运源,它的最大功率为 3000 mW,三个波长分别为 1428.88, 1445.85 和 1467.38 nm;抽运光通过 WDM 耦合到 SMF 中,其中拉曼抽运光的传输方向与要放大的信号功率(布里渊抽运光)方向相反,称之为背向抽运配置;光谱分析仪(OSA)用于测量系统的输出光谱,通过 OSA1 观察的光信号传输称为前向传输,通过 OSA2 观察的光信号传输称为后向传输。

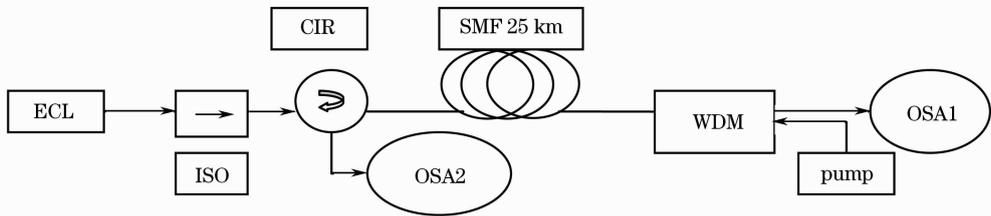


图 1 实验装置

Fig. 1 Experimental setup

3 实验结果及分析

图 2 是后向输出的级联受激布里渊散射特征光谱。从图 2(a)可以看到,0 级为残余的信号光;1,3 级为受激布里渊散射,2 级为受激布里渊散射的瑞利散射。后向受激布里渊散射光谱带宽比后向布里渊散射的瑞利散射要宽,受激布里渊散射峰值功率比受激布里渊散射的瑞利散射要高,这是因为光纤中瑞利散射比布里渊散射要弱。当抽运功率为 1400 mW 时,如图 2(b)所示,光纤中受激布里渊散射级数和受激布里渊散射的瑞利散射级数都是 89 条,布里渊光谱带宽为 14.812 nm(1544.592~1559.404 nm),布里渊频移为 22 GHz(即波长间隔为 0.166 nm)。图中可以看出一阶受激布里渊散射的峰值功率远远高于高阶受激布里渊散射的峰值,高阶受激布里渊散射比较平坦,形成平坦的梳状光

谱,这是因为功率为 1400 mW 的时候,在拉曼抽运源的背向作用下产生的拉曼增益比较平坦。

图 2(c)是抽运功率为 1600 mW 时后向输出的级联受激布里渊散射光谱,与图 2(b)相比,它的布里渊光谱带宽和级数不变,一阶受激布里渊散射峰值与高阶受激布里渊散射之间差值变小,梳状光谱峰值比抽运功率为 1400 mW 时增加 3 dBm,由于拉曼增益随着抽运功率的增加而增加,光纤中受激布里渊谱线的光强也随之提高,然而一阶受激布里渊散射功率已经比较高,趋于饱和,因此变化不大。

抽运功率在 1400~2000 mW 范围内,光纤中后向级联受激布里渊散射谱线的平坦性好,光谱图与图 2(b),(c)相似;级联受激布里渊散射的各阶峰值功率随着抽运功率的增加而增加,又因为一阶受激布里渊散射功率增加速度比高阶的受激布里渊散射

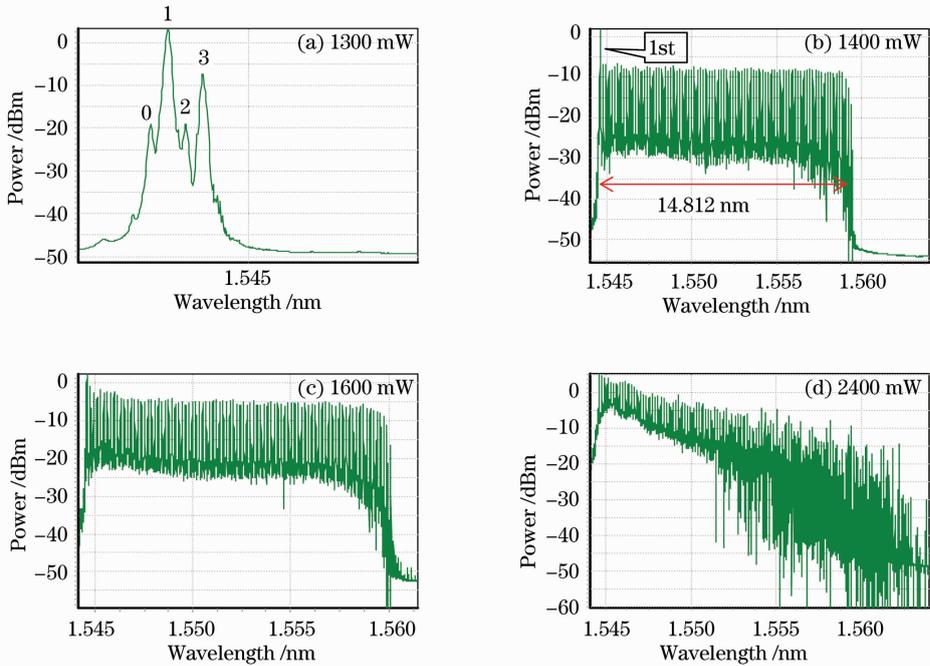


图2 不同抽运功率下的后向输出光谱

Fig. 2 Backward-propagating spectrum under different pump powers

要慢,所以两者之间的差距慢慢减小。当抽运功率大于 2000 mW 时,如图 2(d)所示,光纤中的受激布里渊散射平坦谱线会倾斜,平坦性变差,这是因为当抽运功率大于 2000 mW 时,抽运源的两个波长的功率分布发生变化,导致 1545~1560 nm 范围内的拉曼增益不再平坦。

图 3 是前向输出的级联受激布里渊散射光谱。在无抽运功率抽运下,信号光的波长为 1544.53 nm,功率为 -6.2 dBm,信号光功率未达到受激布里渊散射阈值,光纤中不能产生受激布里渊散射现象。当抽运功率增加到 1000 mW 时,如图 3(a)所示,信号光强度被放大,其功率为 4.5 dBm,光纤中产生一阶受激布里渊散射现象,一阶受激布里渊散射谱线的波长为 1544.617 nm,功率为 -29.6 dBm。当抽运功率增加到 1400 mW 时,如图 3(b)所示,光纤中可以产生 13 阶受激布里渊散射。表 1 是当抽运功率为 1400 mW 时前 6 阶受激布里渊散射光谱的波长和峰值强度,经计算,各级受激布里渊散射平均波长间隔为 0.0846 nm,平均布里渊频移为 11.8 GHz,与理论

值 11.1 GHz 比较接近。图 3(b)中 1,3,5 等奇数阶是前向受激布里渊散射的瑞利散射;2,4,6 等偶数阶为前向受激布里渊散射引起的高阶布里渊散射。如表 1 和图 3 所示,奇数阶的峰值功率小于偶数阶,这是因为光纤中受激布里渊散射的强度总是比瑞利散射的要大;奇数阶的光谱带宽比偶数阶的要窄,由分布式瑞利散射镜构成的干涉仪具有很强的光谱选择性^[1]。

图 3(c)是抽运功率为 1600 mW 时光纤前向受激布里渊散射图,图中可以观察到级联受激布里渊散射级数有 87 条,与抽运功率为 1400 mW 时 13 条受激布里渊散射谱线相比,这时光纤中受激布里渊散射增加了 74 条。抽运功率为 2400 mW 时,如图 3(d)所示,光纤中级联受激布里渊散射谱线达到 1558 nm,受激布里渊散射级数可达 156 条,光谱图与图 3(c)很相似。表 2 为在不同抽运功率抽运下前向受激布里渊散射的级数,当抽运功率增加到 1600 mW 以上时,光纤中会产生多于一百阶的级联受激布里渊散射现象;随着抽运功率的增加,光纤中

表 1 抽运功率为 1400 mW 时 SBS 的波长和光强

Table 1 SBS wavelength and intensity of pumped power at 1400 mW

Order of SBS	1	2	3	4	5	6
Wavelength /nm	1544.617	1544.704	1544.787	1544.878	1544.969	1545.040
Output power /dBm	-13.0	1.8	-13.2	-1.6	-17.7	-5.6

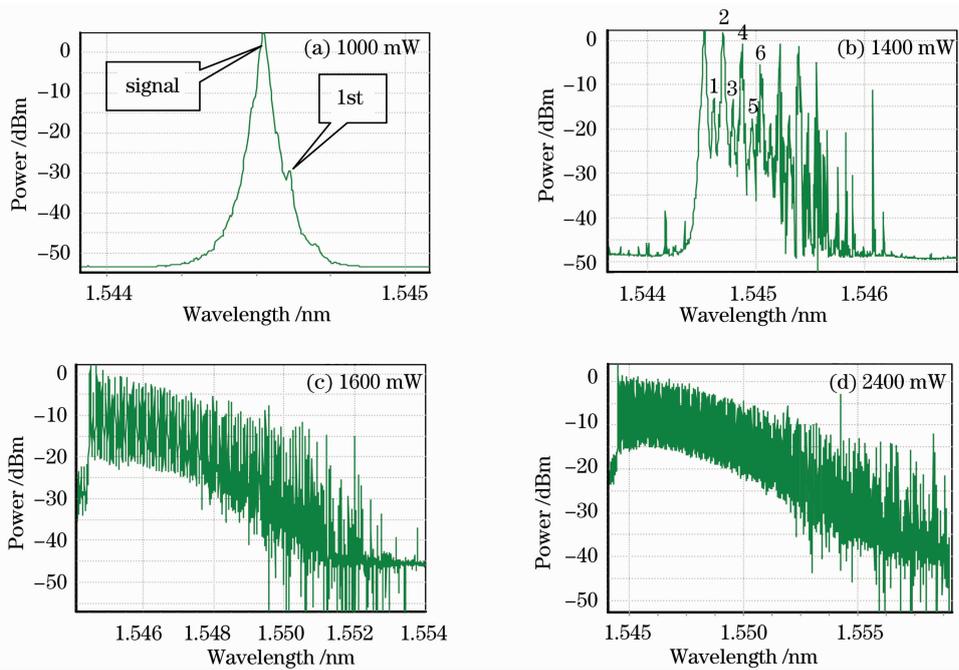


图 3 不同抽运功率下的前向输出光谱

Fig. 3 Forward-propagating spectrum under different pump powers

级联受激布里渊散射级数先增加后减少,增加的速度不一样,在 1400~1600 mW 范围内布里渊级数增加最快,在 2400~2600 mW 范围内布里渊级数最多,这是因为拉曼抽运功率在这个范围内前向拉曼放大效果最佳,如果拉曼抽运功率再增加,光纤中拉曼串扰等其他非线性效应会影响受激布里渊效应,从而抑制后面的高阶受激布里渊散射。

图 4 是抽运功率为 1600 mW 时光纤中级联布里渊散射的局部放大图,波长在 1544~1546 nm 范围内,图 4(a)为后向传输的受激布里渊散射光谱图,图 4(b)为前向传输的受激布里渊散射光谱图,图中可以清晰地观察到光纤中各阶受激布里渊散射的峰值特性和宽谱带宽。图 4(a)中可以看到后向输出光谱中除了 0 阶是残留信号光的瑞利散射外,还有 1,3,5 等奇数阶为后向级联受激布里渊散射谱线和 2,4,6 等偶数阶为后向受激布里渊散射的瑞利散射谱线。奇数阶和偶数阶的平均峰值分别为 -2 dBm 和 -17 dBm,两者峰值差为 15 dBm,奇数阶的峰值功率远远大于偶数阶的峰值功率,这是因为布里渊散射系数较大,随着传输距离的增加使受激布里渊散射功率迅速增加,在抽运功率较大的情况下,级联的受激布里渊散射出现饱和现象,而瑞利散射是弹性散射,不会发生受激放大,瑞利系数也很小。图 4(b)中可以看到前向输出光谱中除了 0 阶是残留信号光的瑞利散射外,还有 1,3,5 等奇数阶为前向级联受激布里渊散射的瑞利散射谱线和 2,

4,6 等偶数阶为前向受激布里渊散射谱线,奇数阶的峰值功率比偶数阶要小,与后向峰值差相比,前向的峰值差较小。后向奇数阶受激布里渊散射与前向偶数阶受激布里渊散射光强度相同;而后向偶数阶受激布里渊散射的瑞利散射与前向奇数阶受激布里渊散射的瑞利散射光强度相差很大。

表 2 不同抽运功率下前向 SBS 的级数

Table 2 Series of SBS under different pump powers

Pump power /mW	Series of SBS
1200	3
1400	13
1600	87
1800	112
2000	129
2200	145
2400	156
2600	156
2800	145

拉曼抽运下光纤中前、后向传输都可以产生级联受激布里渊散射现象,如果用来制作多波长布里渊激光器,后向输出的梳状波频率间隔是前向输出的 1 倍,即 2 个布里渊频移,前向输出的梳状受激布里渊散射波级数比后向输出的要多 1 倍,这是因为后向传输中偶数阶受激布里渊散射的瑞利散射峰值功率太小,随着拉曼功率增加,使放大的干扰信号淹没受激布里渊散射的瑞利散射光谱,最后只剩下奇

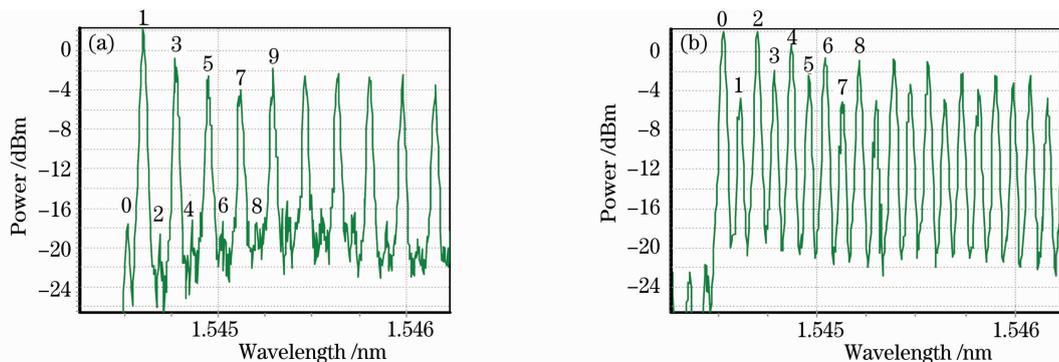


图 4 抽运功率为 1600 mW 时 OSA 上的局部图。(a)后向,(b)前向

Fig. 4 Local figure of pumped power at 1600 mW. (a) back, (b) forth

数阶的受激布里渊散射谱;而前向传输中还存在奇数阶受激布里渊散射的瑞利散射和偶数阶受激布里渊散射。与前向传输相比,后向传输产生的受激布里渊散射谱线的平坦性好。

单波长拉曼激光器抽运的受激布里渊散射实验中,当抽运功率达到 1200 mW 时输出的受激布里渊散射谱线只有 6 阶^[1],与单波长拉曼放大器相比,运用三波长拉曼激光器作为抽运源具有如下优点:首先三波长拉曼光纤激光器的功率可以做得比较大,其次三波长抽运可以得到比较宽的增益,并且可以通过改变不同波长的功率使增益更加平坦。因此更容易得到平坦性比较好阶数更多的级联受激布里渊散射。

4 理论分析

SBS 是一种在光纤内发生的光学非线性现象,其所需要的入射光功率远低于 SRS 所要求的抽运水平,一旦达到布里渊阈值,SBS 将把入射光功率转换为后向斯托克斯波^[12]。SBS 是入射的强激光光场与介质的电致伸缩产生的弹性声波场耦合的结果,这个散射过程可以看成是一个抽运光子的湮没,同时产生了一个斯托克斯光子和一个声频声子,由于在散射过程中能量和动量必须守恒,则三个波长之间的频率关系为

$$\Omega_B = \omega_p - \omega_s, \quad (1)$$

式中 Ω_B 为声波的频率, ω_p 为抽运光频率, ω_s 为斯托克斯光频率。斯托克斯光的频率比抽运光低,因此在 SBS 过程中产生了频移,称之为布里渊频移,设频移为 ν_B ,在光纤中只有前、后向为相关方向,而 SBS 仅发生在后向,且后向布里渊频移 ν_B 为

$$\nu_B = \frac{\Omega_B}{2\pi} = \frac{2n\nu_A}{\lambda_p}, \quad (2)$$

式中 n 为光纤折射率, ν_A 为声波速度, λ_p 为抽运光波长。若 $\nu_A = 5.96$ km/s, $n = 1.45$,则对于石英光纤,在 $\lambda_p = 1550$ nm 附近,算得 ν_B 约为 11.1 GHz,因此斯托克斯光的波长和抽运光波长很相近,波长差为 0.09 nm。

阈值特性是 SBS 的重要特性之一,当散射光在光纤入口处的功率值等于入射光在该处的功率时,该入射光功率被定义为 SBS 阈值,即当入射光强度超过一定的阈值后,SBS 才会发生。SBS 阈值理论公式为

$$P_{th} = \frac{GA_{eff}}{g_B L_{eff}}, \quad (3)$$

式中 P_{th} 是 SBS 阈值, G 为阈值增益系数,在一定条件下近似为常数,约为 21, A_{eff} 为光纤有效截面积, g_B 为布里渊增益峰值, L_{eff} 为光纤有效作用长度,表达式为

$$L_{eff} = \frac{[1 - \exp(-\alpha L)]}{\alpha}, \quad (4)$$

式中 L 为光纤长度, α 为光纤衰减系数。

根据理论计算,当没有抽运源放大时,二阶布里渊散射的阈值是一阶布里渊散射的 130 倍,所以在通常情况下光纤实验中很难观察到二阶布里渊散射的散射谱线;在有抽运源放大如拉曼放大器情况下,由于光纤中双瑞利折射效应和四波混频效应作用,导致二阶布里渊散射光子的出现,于是加快布里渊散射现象的出现,从而二阶布里渊散射的阈值大大降低,其阈值比一阶要大 15 倍左右。因为拉曼抽运源的拉曼放大效应,可以进一步降低 SBS 的阈值^[1,13]。

在拉曼抽运源作用下,光纤中受激布里渊散射的阈值和拉曼增益的平均积分成反比,当拉曼增益增大时,受激布里渊散射的阈值会降低^[8]。在三波

长拉曼激光器抽运下,当抽运功率达到一个特定值(1400 mW)时,可以得到级联受激布里渊-瑞利散射,其平坦系数高,光谱带宽广。

级联布里渊散射-瑞利散射谱线中布里渊散射的谱线宽度比瑞利散射谱线大,原因分析如下^[2]:1)布里渊散射源于自发布里渊散射光子的受激放大,其增益带宽较窄,只有 20 MHz 左右,布里渊-瑞利散射相邻级次光谱之间的频率相差 10 GHz,布里渊散射的发生需要具有一定的抽运功率强度,因此抽运功率只有中心波长附近大于布里渊阈值才对激发布里渊散射起作用;2)因为布里渊散射系数较大,其受激功率随传输距离的增加会迅速增大,所以当抽运功率较大时就会出现级联散射,对各级受激布里渊散射谱线而言,一方面在前一级布里渊散射波的抽运下受激放大,另一方面又抽运下一级布里渊散射,这种光功率的消耗引起布里渊散射谱线的饱和变宽,抽运功率越大则相应的饱和程度就越深,因此出现受激布里渊散射谱线展宽现象;3)瑞利散射是一种频率不变的弹性散射,其散射系数较小,同时不会因为传输距离的增加产生受激放大,所以虽然各级次布里渊散射的瑞利散射强度随着抽运功率增加而增加,但是随着传输距离的增加,其强度增加幅度小于布里渊散射强度的增加,而且它的中心功率也不会因受激散射转移到高级次散射,所以不会出现饱和现象,从而不会导致瑞利散射谱线饱和变宽。

5 结 论

三波长拉曼抽运源背向抽运下,光纤中前、后向都可以产生级联的受激布里渊散射,但是它们的特征有所不同。在实验中观察到的前、后向级联受激布里渊散射的最高级数分别为 156 条和 89 条,前、后向受激布里渊散射相邻级次光谱之间的频移分别为 11 GHz 和 22 GHz,即它们波长间隔分别为 0.085 nm 和 0.166 nm,光谱带宽分别为 13.580 nm 和 14.812 nm;与前向传输相比,后向输出的平坦性要好,但是布里渊级数要少。与单波长拉曼放大器相比,运用三波长拉曼激光器作为抽运源更容易得到平坦性比较好、阶数更多的级联受激布里渊散射。

参 考 文 献

1 Liu Honglin, Feng Chunyuan, Zhang Zaixuan *et al.*. Cascaded stimulated Brillouin scattering in a distributed fiber Raman

- amplifier[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2005, **32**(11): 30~32
- 刘红林,冯春媛,张在宣等. 光纤拉曼放大器中级联的受激布里渊散射[J]. *光电工程*, 2005, **32**(11): 30~32
- 2 Yun Peng, Chi Ronghua, Li Yigang *et al.*. Study on Brillouin-Rayleigh scattering under Raman pump[J]. *Acta Physica Sinica*, 2004, **52**(12): 4229~4235
- 运鹏,迟荣华,李乙钢等. 拉曼抽运下的布里渊-瑞利散射研究[J]. *物理学报*, 2004, **52**(12): 4229~4235
- 3 Hu Shuling, Zhang Chunxi, Gao Chunqing *et al.*. Stimulated Raman scattering and stimulated Brillouin scattering effects in ytterbium doped double clad fiber laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(1): 6~10
- 胡妹玲,张春熹,高春清等. 包层抽运掺镱光纤激光器中受激拉曼散射和受激布里渊散射效应[J]. *中国激光*, 2008, **35**(1): 6~10
- 4 Liu Honglin, Zhang Zaixuan, Zhuang Songlin. Solving the propagation equation of bi-direction pumped fiber Raman amplifier with shooting method[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2004, **31**(12): 46~49
- 刘红林,张在宣,庄松林. 用打靶法求解双向泵浦的拉曼放大器传输方程[J]. *光电工程*, 2004, **31**(12): 46~49
- 5 Qin Zujun, Zhou Xiaojun, Wu Haocheng *et al.*. Design of multi-wavelength cascaded Raman fiber lasers[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(1): 244~248
- 秦祖军,周晓军,伍浩成等. 多波长级联拉曼光纤激光器的设计[J]. *光学学报*, 2009, **29**(1): 244~248
- 6 Xing Lei, Feng Xue, Zhang Lei *et al.*. Stimulated Brillouin scattering hybrid Q-switched Er-doped fiber laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(3): 338~342
- 邢磊,冯雪,张磊等. 受激布里渊散射主被动混合调 Q 光纤激光器[J]. *中国激光*, 2008, **35**(3): 338~342
- 7 Wang Zhengping, Hu Dawei, Zhang Huaijin *et al.*. External resonator SrWO₄ Raman laser excited by 1064 nm pico-second pulses[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(2): 335~338
- 王正平,胡大伟,张怀金等. 1064 nm 皮秒脉冲激发的外腔式 SrWO₄ 拉曼激光器[J]. *中国激光*, 2010, **37**(2): 335~338
- 8 A. Kobayakov, M. Mehendale, M. Vasilyev *et al.*. Stimulated Brillouin scattering in Raman-pumped fibers: a theoretical approach[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2002, **20**(8): 1635~1643
- 9 Zhang Zaixuan, Wang Jianfeng, Li Chenxia *et al.*. Experimental study on cascaded stimulated Brillouin scattering crosstalk in a S band fiber Raman amplifier[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(12): 1672~1676
- 张在宣,王剑锋,李晨霞等. 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[J]. *光学学报*, 2004, **24**(12): 1672~1676
- 10 B. Min, P. Kim, N. Park. Flat amplitude equal spacing 798-channel Rayleigh-assisted Brillouin/Raman multiwavelength comb generation in dispersion compensating fiber[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2001, **13**(12): 1352~1354
- 11 K. D. Park, B. Min, P. Kim *et al.*. Dynamics of cascaded Brillouin-Rayleigh scattering in a distributed fiber Raman amplifier[J]. *Opt. Lett.*, 2002, **27**(3): 155~157
- 12 G. P. Agrawal. *Nonlinear Fiber Optics* (3rd ed.)[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2002
- G. P. Agrawal. *非线性光纤光学(第三版)*[M]. 北京:电子工业出版社, 2002
- 13 T. H. Russel, W. B. Roh. Threshold of second-order stimulated Brillouin scattering in optical fiber[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2002, **19**(10): 2341~2345