

多纵模半导体激光抽运的拉曼光纤放大器中梳状波产生机理研究

刘明春 刘艳格 冯少奇 王 志

(南开大学现代光学研究所光电信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300071)

摘要 在多纵模半导体激光器(LD)前向抽运的拉曼光纤放大器中,发现被放大的信号波长两侧存在超过 100 个波长的梳状波现象,分析并研究了该梳状波产生的机理。抽运光中多个纵模和输入信号之间的四波混频作用是该梳状波产生的根本原因。实验观察并研究了抽运功率、信号功率和信号波长以及抽运方式对该梳状波光谱的影响。

关键词 非线性光学;激光技术;拉曼光纤放大器;四波混频;相位匹配;梳状波

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092912.3467

Generation Mechanism of Comb-Like Waves in Multi-Longitudinal Mode Laser Diode-Pumped Raman Fiber Amplifier

Liu Mingchun Liu Yange Feng Shaoqi Wang Zhi

(Key Laboratory of Opto-Electronic Information and Technology, Ministry of Education, Institute of Modern Optics, Nankai University, Tianjin 300071, China)

Abstract In a forward multi-longitudinal mode laser diode(LD)-pumped Raman fiber amplifier, the comb-like waves with more than 100 wavelengths are found on both sides of the amplified signal wavelength. The generation mechanism of the comb-like waves is analyzed and investigated. The four-wave mixing between a number of longitudinal modes of pump LD and the input signal is the fundamental reason that the comb-like waves generate. The effects of the pump power, signal power, signal wavelength and pump configuration on the comb-wave spectra are observed and investigated.

Key words nonlinear optics; laser technique; Raman fiber amplifier; four-wave mixing; phase match; comb-like waves

1 引 言

光纤拉曼放大器由于具有能放大任何波段信号、能通过多波长抽运得到很宽放大带宽和能采用普通光纤进行分布放大等优点成为目前研究的热点。拉曼放大器需要很高功率的抽运源,采用高功率窄带宽单波长激光器成本比较高,因此对采用带宽比较大的多纵模激光器进行抽运的拉曼放大器的研究有重要意义。

另外,通过对多个抽运源波长进行优化配置得到平坦的宽带增益的拉曼放大器有巨大的应用前景^[1~4],但运用多波长抽运可能因抽运一信号间的四波混频作用产生噪声或者串扰,目前有很多研究致力于消除或减弱放大器中的四波混频效应^[5~11]。总体来说有通过选择合适的光纤、配置信道间隔、色散管理、光学相位共轭和信号光极化正交等方法来削弱四波混频^[12]。同时也有研究希望利用光纤

收稿日期: 2008-12-17; 收到修改稿日期: 2009-03-16

基金项目: 国家自然科学基金(10774077,10674074,50802044)和天津市自然科学基金(06YFJZJC00300)资助课题。

作者简介: 刘明春(1987—),男,硕士研究生,主要从事光纤光学和传感等方面的研究。E-mail: liumc3@163.com

导师简介: 刘艳格(1973—),女,教授,主要从事光纤光学、光纤光子器件及应用等方面的研究。

E-mail: ygliu@nankai.edu.cn

中的四波混频效应,比如进行全光波长变换等^[13~15]。当采用多纵模半导体激光器(LD)抽运时,拉曼放大器中同样会产生四波混频效应,本文就多纵模 LD 抽运拉曼放大器中的四波混频现象进行了研究。

本文主要通过理论和实验研究了采用多纵模 LD 抽运的拉曼放大器中被放大信号波长两侧梳状波产生的机理和光谱特点,分析表明抽运光中多个纵模和输入信号之间的四波混频作用是该梳状波产生的根本原因。发现在同等条件下同向抽运时四波混频效应非常明显而反向抽运时四波混频效应基本观察不到。在同向抽运时输出光谱中的梳状波间隔与信号光波长和抽运光的波长范围相关,梳状波功率随着抽运源功率和信号光功率的增大而增大,并呈现出从信号波长处向两侧逐渐下降的趋势。

2 理 论

当频率为 f_p 和 f_q 的连续抽运光和一个频率为 f_s 的信号光同时传输时,根据四波混频原理在满足一定的相位匹配条件时会产生多个新频率光,在信号光左右两边各有一个新频率光产生。四波混频中的相位匹配条件即是满足其发生前后动能守恒和动量守恒。动能 $E = hf$,其中 h 为普朗克常数。所以由动能守恒,信号光波长左右产生的新频率光频率为

$$f_m = f_s + f_p - f_q \text{ 和 } f_n = f_s - (f_p - f_q)。$$

动量 $p = h\beta$,其中 $h = h/2\pi$, β 为光的传播常数, $\Delta\beta$ 是相位失配量^[16]

$$\Delta\beta = 2\pi\lambda^2(f_s - f_q)(f_p - f_q) \times \left[D(\lambda) - \frac{\lambda^2}{2c}(f_s + f_q - 2f) \frac{dD(\lambda)}{d\lambda} \right]。 \quad (1)$$

当动量守恒时有 $\Delta\beta = 0$,此时四波混频效应最明显,产生的新频率光功率最高。相位失配量 $\Delta\beta$ 决定了四波混频产生的新频率光的功率大小。当光纤中抽运光源和信号光源沿相反方向传播时,由于光子湮灭和产生过程很难满足动量守恒,从而不会有明显的四波混频现象产生。

根据动能守恒条件 $\Delta f_p = \Delta f_s$,又因为 $\Delta f = \frac{c}{\lambda^2}\Delta\lambda$,设抽运光两纵模多波长差为 $\Delta\lambda_p$,四波混频新波长光与信号光波长间的波长差为 $\Delta\lambda_s$,则

$$\Delta\lambda_s = \Delta f_s \frac{\lambda_s^2}{c} = \Delta f_p \frac{\lambda_s^2}{c} = \frac{\lambda_s^2}{\lambda_p^2}\Delta\lambda_p, \quad (2)$$

即 $\Delta\lambda_s$ 与参与四波混频的信号波长、抽运波长以及两抽运纵模的波长间隔有关。

设多纵模 LD 的主要输出波长范围为 $\lambda_{p1} \sim \lambda_{pN}$,当波长大于 λ_{p1} 或者小于 λ_{pN} 时纵模的光功率急剧下降,可以忽略 $\lambda_{p1} \sim \lambda_{pN}$ 以外的功率很低的纵模。显然,任意两个波长抽运纵模都可能和信号光通过四波混频作用在信号光两边产生两个新频率成分。为了分析所有抽运纵模和信号光之间的四波混频效应总效果,把与信号光发生四波混频的两个纵模看成一个纵模组合,两个纵模的波长不同构成不同的组合,它们和信号光之间的四波混频效果也不一样,下面将按照纵模组合进行分析。

假设 LD 抽运源相邻纵模之间的波长间隔为 $\Delta\lambda$,中心波长为 λ_{pm} 。图 1 是当两个抽运源纵模间的波长间隔为 $\Delta\lambda$ 时的纵模组合示意图。此时,所有相邻纵模组成一个组合,一共有 $N-1$ 个组合。由(2)式可知波长为 $\lambda_{pm} - \Delta\lambda$ 和 $\lambda_{pm} + \Delta\lambda$ 的两个纵模和信号光作四波混频产生新波长光波长为

$$\lambda_{\text{new1}} = \lambda_s \pm \frac{\lambda_s^2}{\lambda_{pm}^2}\Delta\lambda。$$

显然,图 1 中所有组合同信号光间四波混作用产生的新波长光的波长相差不大,并以 λ_{new1} 为中心,它们四波混频作用叠加效果是在拉曼放大器的输出光谱波长分别为

$$\lambda_{\text{new1}} = \lambda_s \pm \frac{\lambda_s^2}{\lambda_{pm}^2}\Delta\lambda$$

处产生两个尖峰。

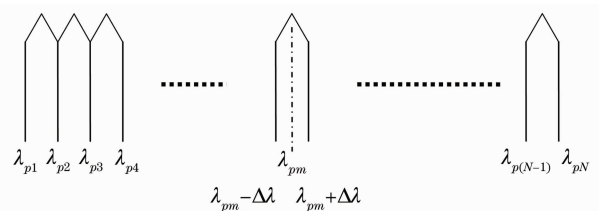


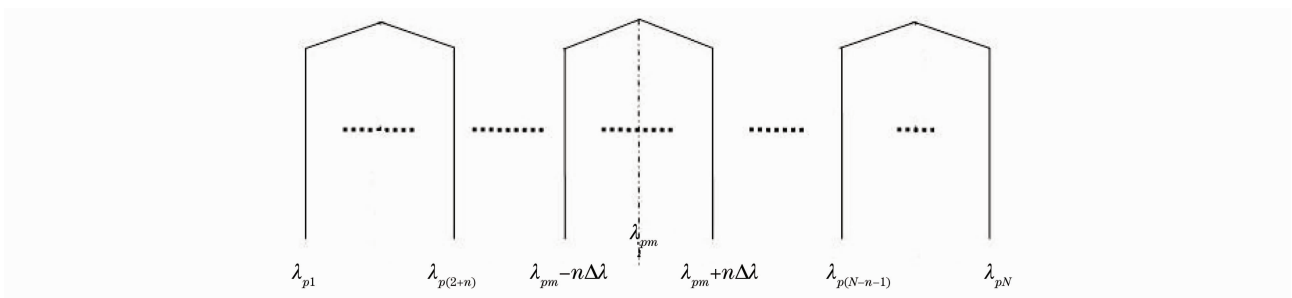
图 1 波长间隔为 $\Delta\lambda$ 时的纵模组合

Fig. 1 Longitudinal modes combination while wavelength interval is $\Delta\lambda$

图 2 是两个纵模之间的波长间隔为 $n\Delta\lambda$ 时抽运纵模组合示意图($n = 1, 2, 3, \dots, N$)。此时一共有 $N-n$ 个组合。同纵模波长间隔为 $\Delta\lambda$ 时相似,所有 LD 抽运源的纵模组合同信号光之间的四波混频作用叠加效果为在拉曼放大器的输出光谱波长分别为

$$\lambda_{\text{newn}} = \lambda_s \pm \frac{\lambda_s^2}{\lambda_{pm}^2}n\Delta\lambda$$

处产生两个尖峰。由于当 n 变大时,抽运组合会相应的减少,从而会导致产生的尖峰的功率逐渐降低。

图 2 波长间隔为 $n\Delta\lambda$ 时的纵模组合Fig. 2 Longitudinal modes combination while wavelength interval is $n\Delta\lambda$

所以,多纵模 LD 的所有纵模和信号光之间的四波混频效应总效果是在信号光波长两边产生波长间隔为 $\Delta\lambda'$ 的梳状波,并且梳状波的功率会从信号波长向两边逐渐降低。其中

$$\Delta\lambda' = \frac{1}{\lambda_{pm}^2} \lambda_s^2 \Delta\lambda. \quad (3)$$

另外,再考虑到新产生的光再次和抽运源阵列产生四波混频效应的情况。当新产生的四波混频光波长与信号光波长相差不大时,抽运阵列和它们通过四波混频再次产生的新波长与同信号光产生的相差不大;而当新波长光波长与信号光波长相差变大时,新产生波长光的功率逐渐降低,再产生四波混频效应会越来越弱,可以忽略。所以二次四波混频的作用只会加宽梳状波光谱中每个尖峰的宽度。总

之,抽运阵列和信号光间的四波混频效应会在信号波段产生间隔为 $\Delta\lambda'$ 的梳状波。另外四波混频效应产生的光会在放大器中被拉曼作用放大,波长越靠近拉曼最高增益波长(同抽运光频率相差约 13 THz)的新产生频率光的增益越高,即拉曼放大会对梳状波功率产生一定的影响。

由于当 LD 抽运源的光谱结果确定时,拉曼放大器中产生的梳状波长的波长间隔只与信号光波长的间隔有关,当信号光的波长也确定时,梳状波的间隔在梳状波产生波段任何波长处恒定不变,稳定性非常好。

3 实 验

实验主要采用图 3 所示的光路基本结构图。

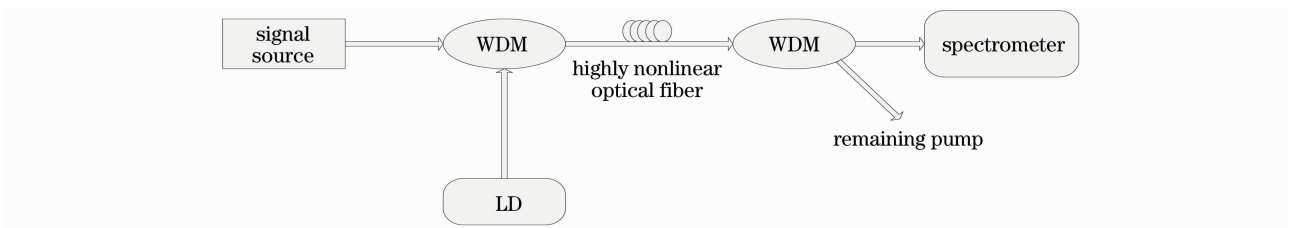


图 3 多纵模 LD 抽运的光纤拉曼放大器结构示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the Raman fiber amplifier structure pumped by a multi-longitudinal mode LD

抽运光和信号光通过一个 1480/1550 的波分复用光耦合器(WDM)耦合到一段高非线性光纤里面,信号光经过放大后再从第二个 WDM 的 1550 nm 端输出,再通过光谱仪测得放大器的输出光谱。其中信号源采用可调谐激光器(Santec TSL-210 V),波长调谐范围为 1500~1630 nm,功率调节范围为 $-40\sim 10$ dBm。

图 4 给出了信号源在功率约为 -6 dBm,波长为 1569.80 nm 时的输出光谱图,实验时信号输出功率约为 -10 dBm。抽运源采用 Fitel 的 LD,额定功率为 300 mW,实验时的功率为 300 mW,输出光

谱中心波长约为 1477 nm。

图 5(a)给出了 LD 的输出光谱图,光谱范围覆盖 1465~1485 nm,图 5(b)为光谱的局部放大细节图,可以看到 LD 的输出光谱为多纵模结构,纵模间隔约为 0.212 nm。作为增益介质的高非线性光纤由武汉长飞光纤光缆有限责任公司拉制,长度约 2.5 km,它在 1550 nm 处的 Raman 增益系数大于等于 $4.8 / (\text{W} \cdot \text{km})$,损耗为 $0.674 \text{ dB} / \text{km}$,非线性系数大于等于 $10 / (\text{W} \cdot \text{km})$,色散系数为 $-4.37 \text{ ps} / (\text{nm} \cdot \text{km})$,C 波段色散斜率小于等于 $0.025 \text{ ps} / (\text{nm}^2 \cdot \text{km})$ 。

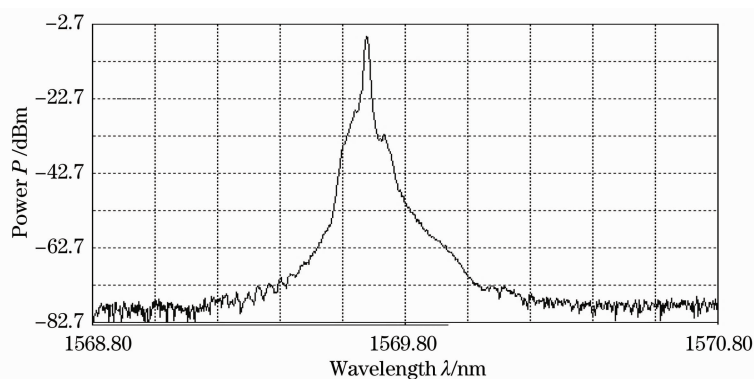


图 4 信号光光谱

Fig. 4 Signal spectrum

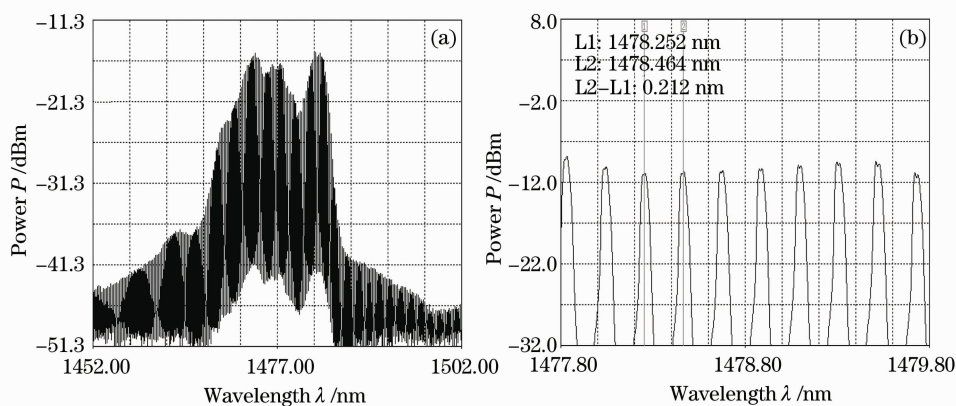


图 5 多纵模 LD 抽运源光谱图

Fig. 5 Spectra of the multi-longitudinal mode LD

图 6 是信号波长为 1559.65 nm 时得到的同向抽运的拉曼放大输出的光谱图。由图可见,在被放大的信号波长两侧有超过 100 个波长的梳状波,且输出功率非常稳定,梳状波分布在信号波长两边 24 nm 的范围内,梳状波的波长间隔为 0.234 nm,梳状波功率从信号波长向两边逐渐降低。在实验中,抽运源波长范围为 1465 ~ 1485 nm,中心波长为 1477 nm,纵模间隔为 0.212 nm,当信号波长为

1559.65 nm 时,根据理论(3)式计算得出 $\Delta\lambda' = \frac{1}{\lambda_{p2}^2} \lambda_s^2 \Delta\lambda = 0.2364$ nm,因此,实验结果和理论计算结果符合得非常好。另外,梳状波的功率从信号波长处向两边逐渐降低,与理论分析部分提到的由于波长间隔 $n\Delta\lambda$ 中的 n 增大,抽运组合数目减少,新波长功率会逐渐降低的理论相符。

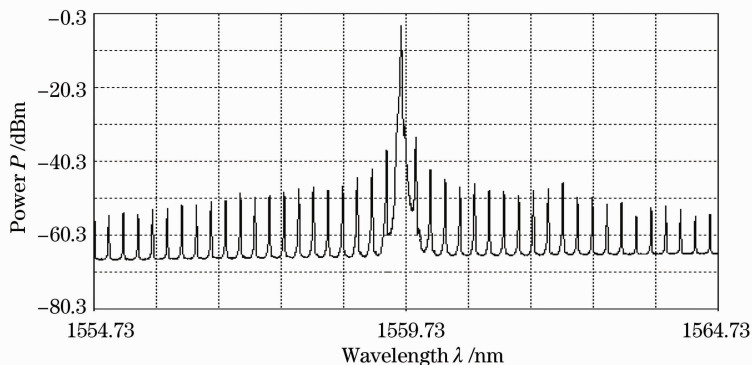


图 6 同向抽运信号波长为 1559.65 nm 时的输出光谱

Fig. 6 Output spectra of the forward-pumped Raman fiber amplifier when the signal wavelength is 1559.65 nm

表 1 是在不同信号波长处的梳状波波长间隔的理论值和实验值。从表 1 可以看出当波长变化时理论和实验总体上也符合得很好。由于从图 5(a)可以看出抽运源在 1465~1485 nm 之外还存在功率很低的纵模成分,所以简单地把 1465~1485 nm 之外功率比较低的纵模忽略掉带来了一定的误差。

表 1 梳状波波长间隔

Table 1 Wavelength interval of comb-like waves

Signal wavelength /nm	Theoretical value /nm	Measured value /nm
1509.73	0.2215	0.218
1559.65	0.2364	0.234
1579.81	0.2340	0.240

图 7 是在信号波长不同的时候得到的输出光谱图,从图中可以看出当信号波长为 1550 nm 左右时四波混频作用最明显,随着信号波长的变大和变小梳状波的总体功率会逐渐降低,这可能是由于信号光波长为 1550 nm 左右时的拉曼增益最高,被拉曼放大后信号功率最高,从而得到的四波混频效应最

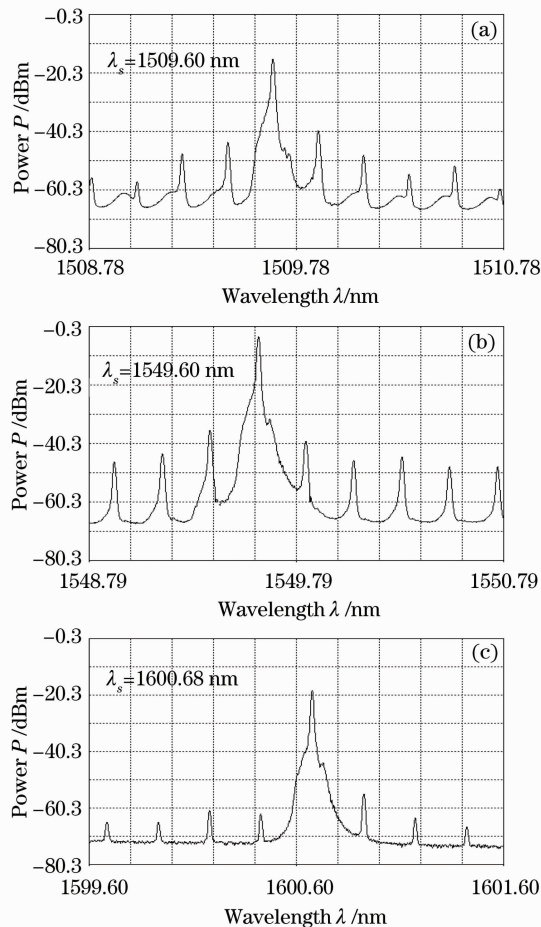


图 7 同向抽运信号波长不同时输出光谱

Fig. 7 Output spectra of the forward-pumped Raman fiber amplifier with different signal wavelengths

明显,当信号波长变大或变小时,放大后信号功率降低从而会导致梳状波的功率的降低。

在采用同向抽运结构,抽运功率为 300 mW,输入信号功率不同时分别测量了光纤拉曼放大器输出光谱图。发现当信号功率为 -40 dBm 时,梳状波只有几个而且功率很低,随着信号功率的增大四波混频效应越明显,四波混频产生的新波长数目越多,新产生的梳状波的功率也越高。

图 8 是在同向抽运信号波长为 1560 nm,信号输入功率约为 -10 dBm 时,在不同抽运功率(50~280 mW)下测得的输出光谱图,从图中可以看出四波混频效应产生的新波长光功率会随抽运功率的增大而增大。另外,还可以看出,当抽运功率增大到一定时候时,梳状波功率会出现饱和现象,特别是当抽运功率从 228 mW 增加到 280 mW 时,梳状波的功率增加已经非常小。

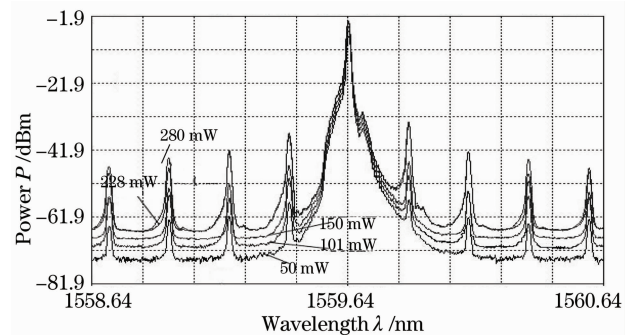


图 8 同向抽运功率不同时的输出光谱图

Fig. 8 Output spectra of the forward-pumped Raman fiber amplifier with different pump power

当抽运方式为反向抽运时,由于反向抽运时很难满足相位匹配条件从而不能产生明显的四波混频效应,四波混频现象基本观察不到。图 9 是在抽运功率为 300 mW,信号功率约为 -10 dBm,信号波长为 1549.8 nm,反向抽运时测得的输出光谱图。从图中

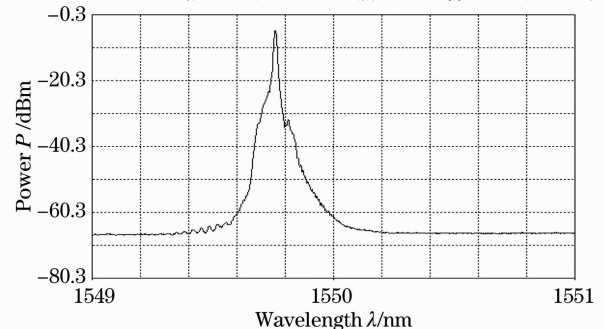


图 9 反向抽运时的输出光谱

Fig. 9 Output spectra of the backward-pumped Raman fiber amplifier

可以看出此时基本上没有四波混频引起的梳状波产生,而且实验发现当信号波长不同时都没有明显的四波混频现象发生。因而,当光纤拉曼放大器采用多纵模 LD 抽运时一般应该采用反向抽运结构。

多纵模 LD 同向抽运拉曼放大器输出的梳状波有以下两个突出的特点:

1) 在信号光和抽运光确定时,梳状波的波长间隔在不同波长处基本一样,并且稳定性非常好。

2) 只要满足一定的色散条件,该梳状波在理论上可以在任何波段产生,通过调节信号光和抽运波长可以在任何波段的梳状波输出。由于多纵模 LD 抽运光纤拉曼放大器输出光谱中的梳状波的特点,可以应用于多波长产生和传感等领域。

4 结 论

本文通过理论和实验证明了多纵模 LD 的多个纵模和信号光之间的四波混频作用是多纵模 LD 同向抽运光纤拉曼放大器输出光谱中的稳定梳状波产生的主要原因。而多纵模 LD 反向抽运时基本没有梳状波的产生。同向抽运时输出光谱中的梳状波间隔与信号光波长和抽运光的波长范围相关,梳状波功率随着抽运源功率和信号光功率的增大而增大,并呈现出从信号波长处向两侧逐渐下降的趋势。

参 考 文 献

- 1 He Jingsuo, Guo Tongwen, Lei Bo *et al.*. Optimal design of multiwave pumped fiber raman amplifier with simplified model [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(7): 819~822
何敬锁,郭同文,雷波等.用简化模型实现多波抽运拉曼光纤放大器的优化设计[J].*光学学报*,2003,**23**(7):819~822
- 2 Chang Jianhua, Zhang Mingde, Sun Xiaohan. A novel method of calculating transmission equations for multiwavelength-pumped fiber raman amplifiers [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(5): 579~582
常建华,张明德,孙小菡.计算多波长抽运光纤拉曼放大器传输方程的新方法[J].*中国激光*,2004,**31**(5):579~582
- 3 Cui Cheng, Liu Jingsong, Ma Xiaoming. Optimization of multiple wavelength bidirectionally pumping fiber raman amplifier [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(12): 1607~1611
崔晨,刘劲松,马晓明.多波长双向抽运光纤拉曼放大器的优化设计[J].*光学学报*,2004,**24**(12):1607~1611
- 4 Ma Yonghong, Xie Shizhong. Optimal design and analysis of broadband fiber raman amplifier [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(1): 42~47
马永红,谢世钟.宽带光纤拉曼放大器的优化设计与分析[J].*光学学报*,2004,**24**(1):42~47
- 5 X. Zhou, M. Birk, S. Woodward. Pump-noise induced FWM effect and its reduction in a distributed Raman fiber amplifier [J]. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 2002, **14**(12): 1686~1688
- 6 S. J. Jung, J. Y. Lee, D. Y. Kim. Novel phase-matching condition for a four wave mixing experiment in an optical fiber [J]. *Opt. Exp.*, 2006, **14**(1): 35~43
- 7 Chang Jianhua, Mao Xiaoli, Tao Zaihong. The research on the four-wave mixing between pump and signal in a forward-pumped raman amplifier [J]. *J. Quantum Electronics*, 2008, **25**(2): 246~251
常建华,冒晓莉,陶在红.同向抽运拉曼放大器中抽运信号间四波混频研究[J].*量子电子学报*,2008,**25**(2):246~251
- 8 Tsute Kung, Chingten Chang, Jengcherng Dung *et al.*. Four-wave mixing between pump and signal in a distributed raman amplifier [J]. *J. Lightw. Technol.*, 2003, **21**(5): 1164~1170
- 9 Ji Weiping, Hu Weisheng. The research on the four-wave mixing in a raman amplifier [J]. *Optical Communication Research*, 2008, **3**: 27~29
季韦平,胡卫生.拉曼光纤放大器中四波混频的研究[J].*光通信研究*,2008,**3**:27~29
- 10 J. C. Bouteiller, L. Leng, C. Headley. Pump-pump four-wave mixing in distributed raman amplified systems [J]. *J. Lightw. Technol.*, 2004, **22**(3): 723~732
- 11 Jean-Philippe Fève. Phase-matching and mitigation of four-wave mixing in fibers with positive gain [J]. *Opt. Exp.*, 2007, **15**(2): 577~582
- 12 Long qiong, Weng Wenhua, Zeng Yan. Four-wave mixing effects in optical transmission and their suppression methods [J]. *Fei Tong Photoelectron Technology*, 2003, **3**(2): 95~97
龙琼,翁文华,曾焱.光传输中四波混频效应及其抑制方法[J].*飞通光电子技术*,2003,**3**(2):95~97
- 13 Liu Yan, Tan Zhongwei, Fu Yongjun *et al.*. All-optical wavelength conversion based on nonlinear optical four-wave mixing [J]. *Semiconductor Photoelectric*, 2003, **24**(2): 110~112
刘艳,谭中伟,傅永军等.基于高非线性光纤四波混频的全光纤波长变换[J].*半导体光电*,2003,**24**(2):110~112
- 14 Xiang Peng, Wang Rong. The four-wave mixing effects in fiber and its all-optical wavelength conversion application [J]. *Military Communications Technology*, 2004, **25**(3): 15~18
项鹏,王荣.光纤中的四波混频效应和它在全光波长变换中的应用[J].*军事通信技术*,2004,**25**(3):15~18
- 15 Dong Jianji, Zhang Xinliang, Huang Dexiu. Experimental study of wavelength conversion at various modulation formats based on four-wave mixing in a semiconductor optical amplifier [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(7): 1327~1332
董建绩,张新亮,黄德修.基于半导体光放大器四波混频效应的多种调制格式的波长转换实验[J].*光学学报*,2008,**28**(7):1327~1332
- 16 F. D. Pasquale, F. Meli. New Raman pump module for reducing pump-signal four-wave-mixing interaction in co-pumped distributed Raman amplifiers [J]. *J. Lightw. Technol.*, 2003, **21**(8): 1742~1748