

文章编号: 0258-7025(2009)08-2052-05

级联光纤参量放大器带宽拓宽的理论研究

李建平¹ 蔺玉珂²

(¹ 怀化学院物理与信息工程系, 湖南 怀化 418008; ² 重庆电子工程职业学院通信工程系, 重庆 401331)

摘要 在小信号条件下, 结合相位补偿, 推导了四波混频耦合方程, 得出了级联光纤参量放大器(CFOPA)的理论输出增益和相位表达式, 借以对 CFOPA 带宽增益特性进行分析, 并与单段光纤参量放大器(SFOPA)相关特性做了比较。分段数 $N=10$ 时, CFOPA 的 3 dB 带宽可以达到 67.2 nm, 而 SFOPA 则只有 12.6 nm, 即通过级联增加了 54.6 nm。同时, 若考虑光纤损耗及级联熔接损耗后, CFOPA 的 3 dB 带宽将保持不变, 而峰值增益降低。研究表明, 将色散位移光纤(DSF)进行多段级联相位补偿可有效提高其放大带宽; 在 DSF 长度、抽运光功率或闲频光初始功率给定时, CFOPA 的增益带宽较 SFOPA 有明显增加, 且具有更好的增益平坦度。

关键词 光纤通信; 光纤参量放大器; 增益带宽; 相位补偿

中图分类号 TN929.11; TN253 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20093608.2052

Theoretical Study on the Bandwidth Broadening of Cascaded Fiber Optical Parametric Amplifier

Li Jianping¹ Lin Yuke²

¹ Department of Physics & Information Engineering, Huaihua College, Huaihua, Hunan 418008, China
² Department of Communication Engineering, Chongqing College of Electronic Engineering, Chongqing, 401331, China

Abstract Considering phase compensation and small signal condition, we derive the four-wave-mixing coupling equations of the cascaded fiber optical parametric amplifier (CFOPA), from which the expressions of the output gain and phase are obtained. Utilizing the obtained expressions, the gain and bandwidth characteristics of CFOPA are analyzed and further compared with the single-segment fiber optical parametric amplifier (SFOPA). The 3 dB bandwidth of the CFOPA can reach 67.2 nm when the dispersion-shifted fiber (DSF) is dividing into ten segments, but the SFOPA is just 12.6 nm. So the bandwidth is increased 54.6 nm through cascading compensation. And then, the 3 dB bandwidth of the CFOPA will remain the same, but the gain decreases when considering the fiber loss and splice loss. Results show that the bandwidth can be broadened significantly by introducing multi-segments cascading compensation to DSF, and the obtained bandwidth is observed much broader and flatter when compared with that of SFOPA for a given DSF length, pumping power, or idle power.

Key words optical fiber communication; fiber optical parametric amplifier; gain bandwidth; phase compensation

1 引 言

近年来,随着密集波分复用光通信网络技术的迅速发展,在实际应用中对光放大器提出了越来越高的要求,利用色散位移光纤(DSF)、高非线性光纤(HNLF)和光子晶体光纤(PCF)设计光纤参量放大器(FOPA)的研究成为提高光纤可利用带宽及进行

全光波长转换的一个热点课题^[1~8]。光子晶体光纤是近年来研制的一种新型光纤,有很大的非线性系数,它比普通光纤的非线性系数高 4~5 倍,但由于制造工艺的限制,目前还不能保证光子晶体光纤在较长的距离中零色散波长的稳定,这就引发零色散波长沿光纤的抖动问题^[9]。

收稿日期: 2008-07-08; 收到修改稿日期: 2009-02-11

基金项目: 怀化学院科研启动项目资助课题。

作者简介: 李建平(1982—),男,讲师,硕士,主要从事光通信及非线性光纤光学等方面的研究。

E-mail: jpli_hhtc@sohu.com

正是由于光子晶体光纤零色散波长在较长距离上的抖动,人们也一直在探索常规色散位移光纤中高增益大带宽的参量放大。2005 年 J. M. C. Biggio 等^[10]用 800 m 的色散位移光纤,两个 2.5 W 的抽运光,得到了 47 nm 的放大带宽,其峰值增益为 37 dB,带内增益变化是 ± 1.5 dB。色散位移光纤虽然非线性系数较小,但其零色散波长较为稳定。

本文基于前期工作^[11],推导出级联 FOPA (CFOPA) 的理论输出增益表达式,借以对其增益带宽特性进行分析,并与单段 FOPA (SFOPA) 相关特性做了比较。利用四波混频耦合方程,推导出了

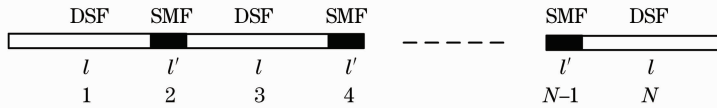


图 1 CFOPA 结构

Fig. 1 Configuration of CFOPA

2.2 理论模型

双抽运 FOPA 是利用光纤三阶非线性极化率 $\chi^{(3)}$ 引起的非简并四波混频原理将输入的信号光加以放大。设抽运光频率分别为 ω_{p1} 和 ω_{p2} , 信号光频率

CFOPA 的增益表达式,并对其做理论分析。通过改变 DSF 长度、抽运光功率、闲频光功率和相位补偿分段数等参数对 FOPA 增益带宽特性进行了数值仿真分析。

2 理论原理

2.1 基本结构

由 DSF 和单模光纤 (SMF) 构成的 CFOPA 的基本结构如图 1 所示。在此结构中,每一段 DSF 长度为 l , 各段 DSF 之间用长度为 l' 的 SMF 连接。信号光和抽运光从第一段 DSF 输入,从第 N 段 DSF 输出。

为 ω_s , 闲频光频率为 ω_i 。各光波在光纤中传输时,它们的幅度将随光纤长度的增加而发生演变,其耦合方程可表示为^[12]

$$\frac{dA_{p1}}{dz} = i\gamma \left[(|A_{p1}|^2 + 2 \sum_{k \neq p1} |A_k|^2) A_{p1} + 2A_{p2}^* A_s A_i e^{i\Delta kz} \right], \quad (1)$$

$$\frac{dA_{p2}}{dz} = i\gamma \left[(|A_{p2}|^2 + 2 \sum_{k \neq p2} |A_k|^2) A_{p2} + 2A_{p1}^* A_s A_i e^{i\Delta kz} \right], \quad (2)$$

$$\frac{dA_s}{dz} = i\gamma \left[(|A_s|^2 + 2 \sum_{k \neq s} |A_k|^2) A_s + 2A_i^* A_{p1} A_{p2} e^{-i\Delta kz} \right], \quad (3)$$

$$\frac{dA_i}{dz} = i\gamma \left[(|A_i|^2 + 2 \sum_{k \neq i} |A_k|^2) A_i + 2A_s^* A_{p1} A_{p2} e^{-i\Delta kz} \right], \quad (4)$$

式中 $\gamma = \frac{n_2^2 \omega}{c A_{\text{eff}}}$ 为非线性因子, A_{eff} 为有效纤芯面积, n_2^2 代表非线性折射率系数, c 为真空中的光速, z 为传播距离, Δk 为相位失配, 定义为

$$\Delta k = k_s + k_i - k_{p1} - k_{p2} = (n_s \omega_s + n_i \omega_i - n_{p1} \omega_{p1} - n_{p2} \omega_{p2}) / c, \quad (5)$$

式中 $n_{p1, p2, s, i}$ 代表光纤模式折射率。

在小信号前提下并忽略光纤传输损耗 α_f , 由文献^[12]可得 SFOPA 输出增益表达式为

$$G_s = 1 + \frac{(\gamma P_0)^2}{g^2} \sinh^2(gl). \quad (6)$$

用相同的方法可以得到 CFOPA 的增益表达式, 即

$$G_{s, n} = 1 + \frac{(\gamma P_0)^2}{g^2} (1 + \eta_{N-1}^2) \sinh^2(gl) + \frac{k\gamma P_0 \eta_{N-1}}{g^2} \sinh^2(gl) \cos \theta_{N-1} + \frac{\gamma P_0 \eta_{N-1}}{g} \sinh(2gl) \sin \theta_{N-1}, \quad (7)$$

$$\eta_{N-1}^2 = P_{i, N-1} / P_{s, N-1}, \quad (8)$$

$$\theta_{N-1} = \theta_{s, N-1} + \theta_{i, N-1}, \quad (9)$$

$$g = \sqrt{(\gamma P_0)^2 - \kappa^2} / 4, \quad (10)$$

$$\kappa = \Delta\kappa + 2\gamma P_0, \quad (11)$$

式中 g 为参量增益系数, κ 为净相位失配, P_0 为抽运光功率, $\theta_{s, N-1}$ 和 $\theta_{i, N-1}$, $P_{s, N-1}$ 和 $P_{i, N-1}$ 分别为第 $N-1$ 段光纤中信号光和闲频光的输出相位和输出功率。

当考虑损耗(包括光纤损耗 α_f 和熔接损耗 α_s , 并将 α_s 平均到 α_f 之后总的等效损耗记为 α_{eq}) 时, 信号光通过级联系统后, 其输出光功率可表示为

$$P_{\text{out}} = P_{\text{in}} e^{-\alpha_{\text{eq}} L}, \quad (12)$$

式中 P_{in} 指没考虑损耗时的输出功率, L 为光纤长度。所以,增益表达式(7)将修正为

$$G_{s,n} = e^{-\alpha_{eq}l} \left\{ \begin{array}{l} 1 + \frac{(\gamma P_0)^2}{g^2} (1 + \eta_{N-1}^2) \sinh^2(gl) + \\ \frac{k\gamma P_0 \eta_{N-1}}{g^2} \sinh^2(gl) \cos \theta_{N-1} + \frac{\gamma P_0 \eta_{N-1}}{g} \sinh(2gl) \sin \theta_{N-1} \end{array} \right\} \quad (13)$$

对得到的增益表达式进行分析 ($\theta_{N-1} = \frac{\pi}{2}, \eta_{N-1} = 1, \alpha_{eq} = 0$), 有

1) 当 $\kappa=0$ 即相位严格匹配时, 有

$$\begin{cases} \text{SFOPA: } G_s^{\max} = 1 + \sinh^2(gl) \approx \frac{1}{4} e^{2gl} \\ \text{CFOPA: } G_{s,n}^{\max} \approx 1 + 2\sinh^2(gl) + \sinh(2gl) = e^{2gl} \end{cases}, \quad (14)$$

2) 当 $|\kappa| \gg \gamma P_0$ 即相位完全失配时, 有

$$\begin{cases} \text{SFOPA: } G_s^{\max} \approx 1 + (\gamma P_0 l)^2 \frac{\sin(\kappa l/2)}{(\kappa l/2)^2} \\ \text{CFOPA: } G_{s,n}^{\max} \approx 1 + 2(\gamma P_0 l)^2 \frac{\sin(\kappa l/2)}{(\kappa l/2)^2} + 2(\gamma P_0 l) \frac{\sin(\kappa l)}{\kappa l} \end{cases}. \quad (15)$$

由(14)式和(15)式表明, 当相位失配不是很大时, 通过级联 SMF 改变相位匹配条件后, 可以提高 FOPA 的输出增益, 即可以用来拓宽 FOPA 的放大带宽; 而对相位失配很大时, 通过 SMF 进行相位补偿后, 其输出增益也有增加, 因此也能拓展一定的带宽。并且, 由于 FOPA 主要用来进行光放大, 闲频光的功率就要小于等于信号光的功率, 所以当 $\eta_{N-1} = 1$ 时, FOPA 有最大的参量增益。若考虑损耗时, 则由(13)式可知, 增益将有所减小。在文献[11]中, 着重分析了 CFOPA 的相位匹配情况, 并得到了最佳 SMF 的补偿长度表达式。本文在第 3 节的数值分析中, 仍采用此最佳 SMF 补偿长度来进行分析。

3 数值分析

数值分析采用 DSF^[10], 其衰减 $\alpha_f = 0.24$ dB/km, 零色散波长为 $\lambda_0 = 1568.2$ nm, 非线性因子 $\gamma = 2.1(\text{W} \cdot \text{km})^{-1}$, DSF 和 SMF 的典型色散值分别为 $\beta_1 = -10^{-4} \text{ ps}^4/\text{km}, \beta_2 = 20 \text{ ps}^2/\text{km}$, 输入信号初始功率为 $P_{s0} = -20$ dBm。

3.1 分段数 N 对 FOPA 的放大带宽的影响

分段数 N 对 FOPA 放大带宽的影响曲线如图 2 示。图 2 中, DSF 长度为 $L = 5$ km, 抽运光波长为 $\lambda_{p1} = 1548.2$ nm, 抽运功率 $P_0 = 500$ mW, 闲频光初始功率 $P_{i0} = -60$ dBm。 $N = 1$ 对应于 SFOPA, 而 $N > 1$ 对应于 CFOPA。由图可知, 分段数 N 越大, FOPA 放大带宽也越大, 增益平坦度越好。当 $N = 10$ 时, 对 SFOPA 来说, 增益波动 3 dB 的放大

带宽只有 12.6 nm, 而 CFOPA 的放大带宽可达

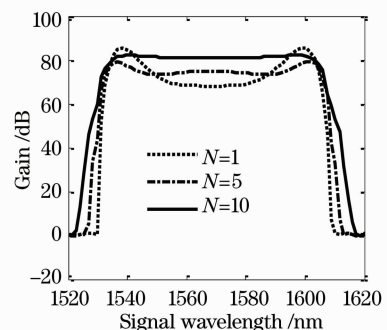


图 2 分段数 N 对 FOPA 带宽的影响
Fig. 2 Influence of segment number N on the bandwidth of FOPA

67.2 nm, 比 SFOPA 的带宽增加了 54.6 nm。若考虑光纤损耗和级联熔接损耗时, CFOPA 的增益与带宽特性如图 3 所示。图 3 中, $N = 10$, 其他参数与

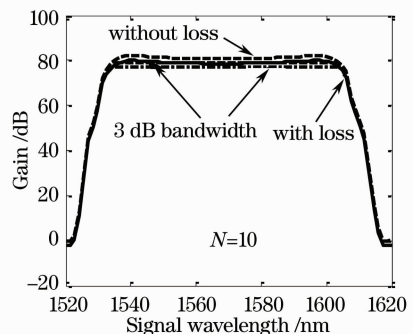


图 3 损耗对 CFOPA 带宽和增益的影响
Fig. 3 Influence of loss on the bandwidth and gain of CFOPA

图 2 中相同,级联熔接损耗取最大允许值 $\alpha_s=0.1$ dB,并被平均到光纤损耗中。由图可知,CFOPA 的 3 dB 带宽保持不变,峰值增益有所降低。

3.2 抽运光功率对 FOPA 放大带宽的影响

文献[12]指出,抽运光功率大小对 FOPA 的增益和放大带宽有很大影响。图 4 和图 5 分别给出了 SFOPA 和 CFOPA 的放大带宽随抽运光功率变化的关系曲线。图 4 和图 5 中, $L = 5$ km, $N = 10$, $\lambda_{p1} = 1558.2$ nm,闲频光初始功率 $P_{i0} = -60$ dBm。

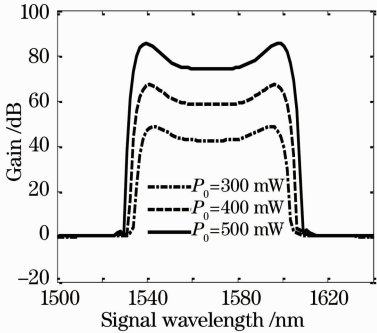


图 4 抽运光功率对 SFOPA 带宽的影响
Fig. 4 Influence of the pump power on the bandwidth of SFOPA

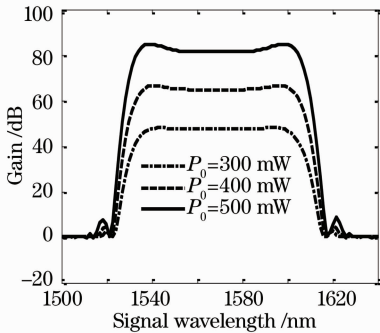


图 5 抽运光功率对 CFOPA 带宽的影响
Fig. 5 Influence of the power of pump on the bandwidth of CFOPA

由图可知,抽运光功率越大,FOPA 的放大带宽越宽,增益越大。然而,对于 SFOPA,由于没有进行相位补偿,在抽运光之间的相位偏移比较大,带宽就被限制在两抽运光附近的小范围内,从而导致带宽比较小。而对于 CFOPA,通过相位补偿后,减小了相位偏移,使抽运光之间的信号光可以有效地放大,这样就增大了放大带宽。从图可以明显看出,CFOPA 的放大带宽比 SFOPA 的放大带宽要大得多,且具有更好的增益平坦度。

3.3 闲频光功率对 FOPA 放大带宽的影响

由 2.2 中分析得知,当定义的 $\eta_{N-1} = 1$ 时,CFOPA 将有最大的参量增益。因此,闲频光初始

光功率的大小也将对 FOPA 的放大带宽产生一定的影响,图 6 和图 7 显示了这种关系。图 6 和图 7 中, $\lambda_{p1} = 1558.2$ nm, $N = 10$, 抽运功率 $P_0 = 500$ mW。从图中可以得出,闲频光初始功率越大,FOPA 的增益越大,增益平坦度越好,但带宽略有减小;同时,CFOPA 比 SFOPA 的放大带宽宽,增益平坦度好。这是因为 FOPA 在伴有闲频光一起传输时,闲频光功率的存在提高了信号光的峰值增益^[13]。

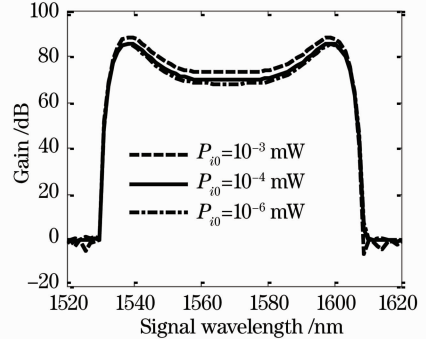


图 6 闲频光功率与 SFOPA 带宽的关系
Fig. 6 Relationship between the idle power and the bandwidth of SFOPA

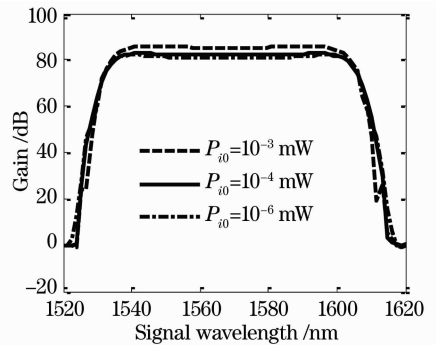


图 7 闲频光功率与 CFOPA 带宽的关系
Fig. 7 Relationship between the idle power and the bandwidth of CFOPA

3.4 光纤长度 L 与 FOPA 放大带宽之间的关系

图 8 和图 9 给出了 FOPA 放大带宽随 DSF 长度变化的关系曲线。图 8 和图 9 中, $\lambda_{p1} = 1558.2$ nm, $N = 10$,抽运功率 $P_0 = 500$ mW,闲频光初始功率 $P_{i0} = -60$ dBm。由文献[10]可知,光纤越长,相位偏移量越大,这将导致放大带宽变窄。但是,通过级联进行相位补偿,可以减小相位偏移量,从而拓展相位失配小的信号光范围,增大 FOPA 的放大带宽。从图可以看出,在 DSF 长度相同时,CFOPA 放大带宽要比 SFOPA 的大很多,且增益平坦度好。

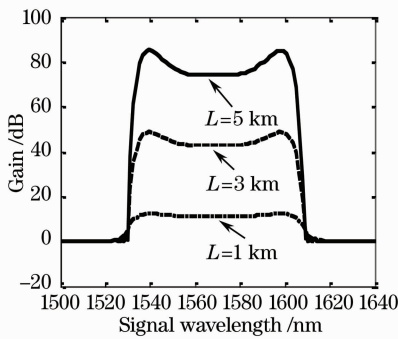


图 8 光纤长度与 SFOPA 带宽的关系

Fig. 8 Relationship between fiber length and bandwidth of SFOPA

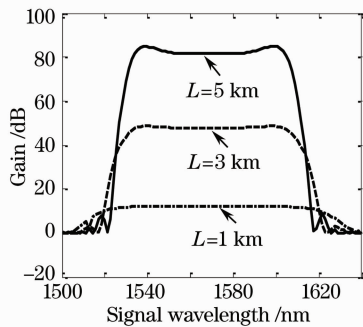


图 9 光纤长度与 CFOPA 带宽的关系

Fig. 9 Relationship between fiber length and bandwidth of CFOPA

4 结 论

在前期工作的基础上,通过推导四波混频耦合方程,得出了 CFOPA 的理论增益和相位输出值表达式,并借其对 SFOPA 和 CFOPA 的性能参数进行比较分析。通过分析得出如下结论:1)采用理论表达式进行分析所得到的结果,与直接利用耦合方程进行数值分析得到的结果相符;2)初始闲频光功率越大,峰值增益越大,但放大带宽略有减小;3)当考虑光纤损耗及级联熔接损耗时,CFOPA 的带宽不变,增益减小。综上所述,推导出的理论表达式可用来分析 CFOPA 的性能参数。

参 考 文 献

1 P. Parolari, L. Matalli, E. Rognoni *et al.*. Influence of pump parameters on two-pump optical parametric amplification [J]. *J.*

Lightwave Technol., 2005, **23**(8): 2524~2529

- 2 T. Renyong, L. Jacob, S. D. Preetpaul *et al.*. Gain characteristics of a frequency nondegenerate phase-sensitive fiber-optic parametric amplifier with phase self-stabilized input [J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(26): 10483~10493
- 3 S. Wabnitz. Broadband parametric amplification in photonic crystal fibers with two zero-dispersion wavelengths [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2006, **24**(4): 1732~1738
- 4 M. E. Marhic, F. S. Yang, M. C. Ho *et al.*. High-nonlinearity fiber optical amplifier with periodic dispersion compensation [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1999, **17**(2): 210~215
- 5 Zhao Liang, Sun Junqiang. Gain characteristics of dual-pump optical parametric amplifiers [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(8): 1086~1091
- 赵亮, 孙军强. 双抽运光参量放大的增益特性[J]. *中国激光*, 2007, **34**(8): 1086~1091
- 6 Li Qiliang, Li Yuanmin, Qian Sheng. Gain of cascaded two-pump fiber-optical parametric amplifier with high order dispersion [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(6): 760~764
- 李齐良, 李院民, 钱胜. 具有高阶色散双抽运级联光纤参量放大器的增益[J]. *中国激光*, 2006, **33**(6): 760~764
- 7 Jiang Yang, Yu Jinlong, Zhang Aixu *et al.*. All optical multi-wavelength conversion and data format conversion based on dual-pumped fiber optical parametric amplifier [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(6): 1051~1056
- 江阳, 于晋龙, 张爱旭等. 双抽运光纤参量放大的全光多波长变换与码型转换[J]. *光学学报*, 2008, **28**(6): 1051~1056
- 8 Wang Zinan, Xu Yongzhao, Zhang Xia *et al.*. Wavelength conversion based on cross-phase modulation in microstructure fibers [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(3): 414~417
- 王子南, 徐永钊, 张霞等. 基于微结构光纤中交叉相位调制效应的波长变换[J]. *中国激光*, 2008, **35**(3): 414~417
- 9 F. Yaman, Q. Lin, S. Radic *et al.*. Impact of dispersion fluctuations on dual-pump fiber-optic parametric amplifiers [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2004, **16**(5): 1292~1294
- 10 J. M. C. Biggio, J. D. Marconi, H. L. Fragnit. Double-pumped fiber optical parametric amplifier with flat gain over 47-nm bandwidth using a conventional dispersion-shifted fiber [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2005, **17**(9): 1842~1844
- 11 Li Jianping, Luo Bin, Pan Wei *et al.*. Study on the bandwidth broadening of optical parametric amplifier based on conventional dispersion-shifted fiber [J]. *Laser Technology*, 2007, **31**(4): 337~340
- 李建平, 罗斌, 潘炜等. 常规 DSF 光纤参量放大器的带宽拓宽研究[J]. *激光技术*, 2007, **31**(4): 337~340
- 12 G. P. Agrawal. *Nonlinear Fiber Optics & Applications of Nonlinear Fiber Optics* [M]. Jia dong-fang, Yu Zhen-hong *et al.*, transl., 3rd ed., Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2002. 245~247
- Govind P. Agrawal. *非线性光纤光学原理及应用* [M]. 贾东方, 余震虹等译. 第 3 版. 北京: 电子工业出版社, 2002. 245~247
- 13 H. S. Roger, E. B. John. Parametric amplification and frequency conversion in optical fibers [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1982, **QE-18**(7): 1062~1072