

文章编号: 0258-7025(2006)06-0760-05

具有高阶色散双抽运级联光纤 参量放大器的增益

李齐良^{1,2}, 李院民¹, 钱 胜¹

(¹ 杭州电子科技大学通信工程学院光纤通信网实验室, 浙江 杭州 310018)
² 四川大学物理科学与技术学院, 四川 成都 610064)

摘要 利用一组耦合方程,在理论上推导出了双抽运、三段光纤级联结构的参量放大器的增益表达式。研究表明在双抽运情况下,光纤参量放大器(FOPA)的增益随光纤长度、抽运光功率的增加而变大;同时,增益的大小和平坦性能也受到光纤色散特性的影响,从反常色散区到正常色散区,增益带宽逐渐变小,增益不平坦性有一定的改善;在二阶色散系数不变的情况下,光纤参量放大器增益带宽随四阶色散数的增加而减小。采用多段光纤级联结构,可以均衡光纤参量放大器增益的不平坦性。

关键词 光纤光学;光纤参量放大器;参量增益;四阶色散;高非线性光纤

中图分类号 TN 929.11;TN 253 **文献标识码** A

Gain of Cascaded Two-Pump Fiber-Optical Parametric Amplifier with High Order Dispersion

LI Qi-liang^{1,2}, LI Yuan-min¹, QIAN Sheng¹

¹ *Laboratory of Fiber-Optical Communication Network,
College of Communication of Hangzhou Dianzi University, Hangzhou, Zhejiang 310018, China*
² *Institute of Physics Science and Technology, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610064, China*

Abstract By the use of a set of coupled equations, the gain expression of two-pump fiber optical parametric amplifier (FOPA) with three-section nonlinear fibers is deduced theoretically. It is indicated that the parametric gain has a relationship with the pumps power, the fiber's length and the fiber's dispersion characteristic as well. From abnormal dispersion region to normal dispersion region, the bandwidth reduced and became flattened. Assume the fiber's second-order dispersion keeps constant, with the increase of the fiber's fourth-order dispersion, the bandwidth is reduced accordingly. By using multi-section fiber arrangement, the parametric gain can be flattened by adjusting the fiber's parameters.

Key words fiber optics; fiber optical parametric amplifier; parametric gain; fourth-order dispersion; high nonlinear fiber

1 引言

光纤参量放大器(FOPA)是基于非线性四波混频效应的光子器件。参量过程中,当相位匹配条件得到满足时,在抽运光的作用下,小信号光将被放大,同时产生闲频光。由于四波混频对信号的响应是几乎同时的,这就决定了这种器件具有超快的信

息处理能力,能够满足全光网络对光放大器器件的要求。除此之外,光纤参量放大器理论上可以放大任意波长的信号,有很宽的带宽,还具有接近于器件量子极限的低噪声的特点^[1~4],而掺铒光纤放大器放大信号的同时,还会产生自发辐射噪声,而且这种噪声在级联的链路中被不断地放大^[5]。因此与掺铒光

收稿日期:2005-07-14;收到修改稿日期:2005-10-24

基金项目:浙江省教育厅科学研究项目(20030627)资助课题。

作者简介:李齐良(1965—),男,湖南衡阳人,杭州电子科技大学教授,博士后,主要从事光纤通信技术研究。E-mail: liqiliang2@yahoo.com.cn

纤放大器^[6,7]比较, 光纤参量放大器具有高带宽、低噪声的优势。

光纤参量放大器之所以还没有到实用阶段, 是因为基于四波混频的光参量过程要严格满足频率和相位匹配条件^[8]。对于单抽运的情况^[9,10], 要求信号光和抽运光的偏振要一致, 如果正交, 增益几乎为零。为了解决偏振相关性, 一般采用正交偏振双抽运方式, 即两抽运源偏振方向相互正交, 这样增益与信号的偏振度没有关系, 解决了增益对信号偏振的敏感性^[11,12]。

本文将利用一组耦合方程, 分析级联光纤参量放大器的增益特性, 推导它的增益表达式, 这里光纤参量放大器采用双抽运、三段高非线性光纤(HNLF)级联的结构形式。

2 理论模型

在光纤内, 光场的慢变幅度 $A_j(z)$ 的演化可由一组耦合方程来描述^[13]

$$\frac{\partial A_1}{\partial z} + \frac{i}{2}\beta_2 \frac{\partial^2 A_1}{\partial t^2} - \frac{i}{24}\beta_4 \frac{\partial A_1}{\partial t^4} = i\gamma[|A_1|^2 + 2(|A_2|^2 + |A_s|^2 + |A_i|^2)]A_1 + 2i\gamma A_s^* A_s A_i \exp(i\Delta\beta z), \quad (1a)$$

$$\frac{\partial A_2}{\partial z} + \frac{i}{2}\beta_2 \frac{\partial^2 A_2}{\partial t^2} - \frac{i}{24}\beta_4 \frac{\partial A_2}{\partial t^4} = i\gamma[|A_2|^2 + 2(|A_1|^2 + |A_s|^2 + |A_i|^2)]A_2 + 2i\gamma A_1^* A_s A_i \exp(i\Delta\beta z), \quad (1b)$$

$$\frac{\partial A_s}{\partial z} + \frac{i}{2}\beta_2 \frac{\partial^2 A_s}{\partial t^2} - \frac{i}{24}\beta_4 \frac{\partial A_s}{\partial t^4} = i\gamma[|A_s|^2 + 2(|A_1|^2 + |A_2|^2 + |A_i|^2)]A_s + 2i\gamma A_i^* A_1 A_2 \exp(-i\Delta\beta z), \quad (1c)$$

$$\frac{\partial A_i}{\partial z} + \frac{i}{2}\beta_2 \frac{\partial^2 A_i}{\partial t^2} - \frac{i}{24}\beta_4 \frac{\partial A_i}{\partial t^4} = i\gamma[|A_i|^2 + 2(|A_1|^2 + |A_2|^2 + |A_s|^2)]A_i + 2i\gamma A_s^* A_1 A_2 \exp(-i\Delta\beta z), \quad (1d)$$

式中 A_1, A_2 表示两抽运光的慢变幅度, A_s, A_i 表示信号场和闲频场的慢变幅度; z 为沿光纤的纵向距离; t 表示时间; $\beta_i (i = 1, 2, 3, 4)$ 表示光纤的 i 阶色散系数, 考虑到在相位匹配条件满足的情况下, 光纤参量放大器的增益只受偶数阶色散的影响, 因此在这里只考虑了偶数阶色散项^[14,15]。方程右边的第一项对应于自相位调制和交叉相位调制, γ 为光纤的非线性系数; 右边第二项对应于四波混频, $\Delta\beta = \beta_3 + \beta_4 - \beta_1 - \beta_2$ 为相位失配。

3 小信号增益

假设抽运光的强度远大于信号光的强度, 忽略色散的影响以及四个光频之间的微小差别, 从(1a), (1b)式可求得^[16]

$$A_1 = \sqrt{p_1} \exp[i\gamma(p_1 + 2p_2)z], \quad (2a)$$

$$A_2 = \sqrt{p_2} \exp[i\gamma(p_2 + 2p_1)z], \quad (2b)$$

式中 $p_j = |A_j(0)|^2 (j = 1, 2)$, p_1, p_2 为 $z = 0$ 处入射的抽运光功率。这一结果表明, 在无抽运泄漏损耗近似下, 抽运波仅获得由自相位调制和交叉相位调制引起的相移。

把(2a), (2b)式代入(1c), (1d)式, 作关于 t 的傅里叶变换, 可得关于信号场和闲频场的线性耦合方程

$$\frac{\partial \tilde{A}_s}{\partial z} = \left[-\frac{i}{2}\beta_2\omega^2 + \frac{i}{24}\beta_4\omega^4 + 2i\gamma(p_1 + p_2) \right] \tilde{A}_s + 2i\gamma \sqrt{p_1 p_2} \exp(-i\theta z) \tilde{A}_i^*, \quad (3a)$$

$$\frac{\partial \tilde{A}_i^*}{\partial z} = \left[-\frac{i}{2}\beta_2\omega^2 + \frac{i}{24}\beta_4\omega^4 + 2i\gamma(p_1 + p_2) \right] \tilde{A}_i^* + 2i\gamma \sqrt{p_1 p_2} \exp(i\theta z) \tilde{A}_s, \quad (3b)$$

其中 $\theta = \Delta\beta - 3\gamma(p_1 + p_2)$, ω 为脉冲包络的频率。

为了求解(3a), (3b)式, 引入

$$\tilde{A}_j = \tilde{B}_j \exp[i(2\gamma p_1 + 2\gamma p_2 - \frac{i}{2}\beta_2\omega^2 + \frac{i}{24}\beta_4\omega^4)z], \quad j = s, i \quad (4)$$

将(4)式代入(3a), (3b)式可得到

$$\frac{\partial \tilde{B}_s}{\partial z} = 2i\gamma \sqrt{p_1 p_2} \exp(-ikz) \tilde{B}_i^*, \quad (5a)$$

$$\frac{\partial \tilde{B}_i^*}{\partial z} = -2i\gamma \sqrt{p_1 p_2} \exp(ikz) \tilde{B}_s, \quad (5b)$$

式中, 净相位失配为

$$k = \Delta\beta + \gamma(p_1 + p_2) - \frac{1}{2}\beta_2\omega^2 + \frac{1}{24}\beta_4\omega^4. \quad (6)$$

参照文献[17]的方法, $\Delta\beta$ 也可以写成

$$\Delta\beta = \beta_2(\Delta\omega_s)^2 + \frac{1}{12}\beta_4(\Delta\omega_s)^4, \quad (7)$$

式中 $\Delta\omega_s = \omega_s - \omega_c$, $\omega_c = \frac{1}{2}(\omega_1 + \omega_2)$, ω_1, ω_2 为抽运频率, ω_s 为信号频率。

由(5a), (5b)式, 求得信号波和闲频波的形式

$$\tilde{B}_s(z) = (a_3 e^{gz} + b_3 e^{-gz}) \exp(-\frac{i}{2}kz), \quad (8a)$$

$$\widetilde{B}_i^*(z) = (a_4 e^{gz} + b_4 e^{-gz}) \exp\left(\frac{i}{2} kz\right), \quad (8b)$$

式中 a_3, b_3, a_4, b_4 由光纤输入端的初始条件决定, 在 $z = 0$ 处, 初始条件为 $\widetilde{B}_s(z)|_{z=0} = \widetilde{B}_s(0)$, $\widetilde{B}_i^*(z)|_{z=0} = \widetilde{B}_i^*(0)$ 。参量增益系数 g 取决于抽运功率和光纤的色散系数, 定义为

$$g = \sqrt{4\gamma^2 p_1 p_2 - \frac{1}{4} k^2}, \quad (9)$$

从(8a)式可以看出, 光纤参量放大器输出端的信号幅度随光纤长度 L 和抽运功率的增长按指数关系增长。把(8a), (8b)式写成矩阵形式

$$\mathbf{B}(z) = \boldsymbol{\psi}(z) \mathbf{B}(0), \quad (10)$$

式中 $\mathbf{B}(z) = [\widetilde{B}_s(z), \widetilde{B}_i^*(z)]^T$, $\mathbf{B}(0) = [\widetilde{B}_s(0), \widetilde{B}_i^*(0)]^T$ 。结合光纤输入端的初始条件, 按照文献[16]的方法, 可以得到光纤的转移矩阵

$\boldsymbol{\psi}(z) =$

$$\begin{bmatrix} \cosh(gz) + \frac{ik}{2g} \sinh(gz) & \frac{2i\gamma \sqrt{p_1 p_2}}{g} \sinh(gz) \\ -\frac{2i\gamma \sqrt{p_1 p_2}}{g} \sinh(gz) & \cosh(gz) - \frac{ik}{2g} \sinh(gz) \end{bmatrix}, \quad (11)$$

转移矩阵 $\boldsymbol{\psi}(z)$ 表示了光纤的输出光信号 $\mathbf{B}(z)$ 与输入光信号 $\mathbf{B}(0)$ 之间的关系。

目前使用的密集波分复用技术, 要求放大器具有很宽的带宽, 而且在带宽范围内, 增益要具有很好的平坦性。假设整个光纤参量放大器采用 N 段光纤级联的方式, 那么在第 N 段光纤的输出端, 信号场和闲频场可表示为

$$\mathbf{B}(z_N) = \prod_{k=1}^N \boldsymbol{\psi}(z_k) \mathbf{B}(0), \quad (12)$$

式中 $\boldsymbol{\psi}(z_k)$ 为第 k 段光纤的转移矩阵。

定义第 N 段高非线性光纤的输出端信号的增益为

$$G_N = 20 \lg \left[|B_s(z_N)| / B_s(0) \right]. \quad (13)$$

4 仿真分析

从(8a)和(9)式可以看出, 光纤参量放大器的增益和抽运功率大小、光纤长度、二阶色散系数、四阶色散系数以及非线性系数有关, 计算过程中, 用多组参数对式(13)进行仿真, 非线性系数由小到大, 色散系数由大到小, 还通过调节每段光纤的长度、抽运功率参数, 使增益变得更为平坦。为了得到更为优化的光纤参量放大器参数, 可以根据文献[18]中的遗传算法。图 1 和图 2 分别表示高非线性光纤长度

(HNFL)和抽运功率对光纤参量放大器增益的影响。图 1 中, 选取 $\gamma = 20 \text{ km}^{-1}/\text{W}$, $\beta_2 = -0.001 \text{ ps}^{-2}/\text{km}$, $\beta_4 = 1.8 \times 10^{-6} \text{ ps}^{-4}/\text{km}$, 两抽运光功率均为 1 W, 波长分别为 1540 nm 和 1560 nm, 零色散波长 λ_0 为 1550 nm。从图 1 可以看出, 光纤的长度越长, 光纤参量放大器的增益也就越大, 但同时增益的平坦性变差。在图 2 中, 高非线性光纤的长度为 100 m, 其余参量取值与图 1 相同。从图 2 可以看出, 增加光纤参量放大器的抽运光功率, 其增益也随之呈指数关系增长, 同时增益的平坦性也变差。

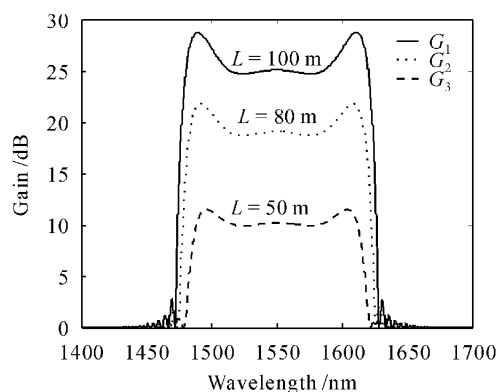


图 1 高非线性光纤长度不同时光纤参量放大器输出端的小信号增益

Fig. 1 Gain of small signals at the FOPA output with different lengths of HNFL

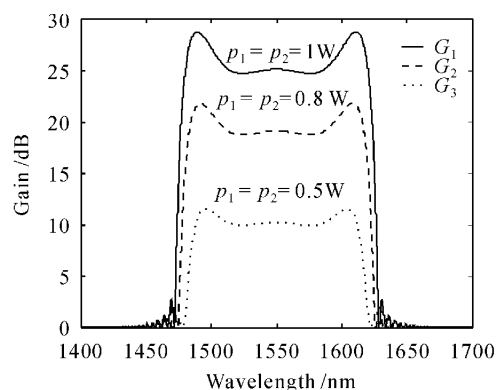


图 2 抽运功率不同时光纤参量放大器输出端的小信号增益

Fig. 2 Gain of small signals at the FOPA output with different pump powers

采用高非线性光纤级联的方案, 通过调节每段高非线性光纤的长度 L , β_2 和 β_4 等参数, 可以改善光纤参量放大器增益的平坦性。图 3 给出了三段高非线性光纤级联结构的光纤参量放大器的增益谱图。

在这里, 零色散波长 λ_0 仍然为 1550 nm, 两抽运波长分别为 1540 nm 和 1560 nm, 每段的抽运光功率分别取 1 W, 0.5 W, 0.2 W, 高非线性光纤的长度为 100 m, 60 m 和 30 m, β_2 分别取 0.0065, 0.001 和 $0.01 \text{ ps}^2/\text{km}$, β_4 分别为 2×10^{-6} , 2×10^{-6} 和 $1 \times 10^{-6} \text{ ps}^4/\text{km}$ 。从图 3 可以看出, 光纤参量放大器采用级连结构后, 其增益的起伏得到了改善, 在 150 nm 带宽内, 增益的起伏小于 2 dB。

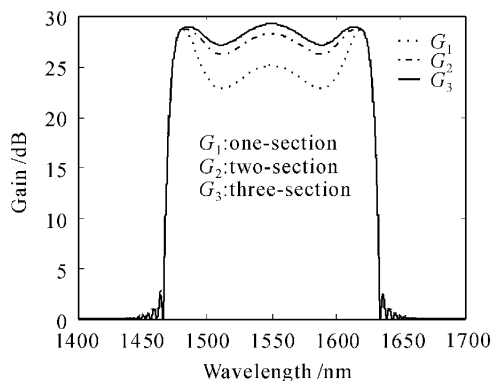


图 3 三段高非线性光纤级联的光纤参量放大器输出端的小信号增益

Fig. 3 Gain of small signals at the FOPA output with three-section HNFL cascaded

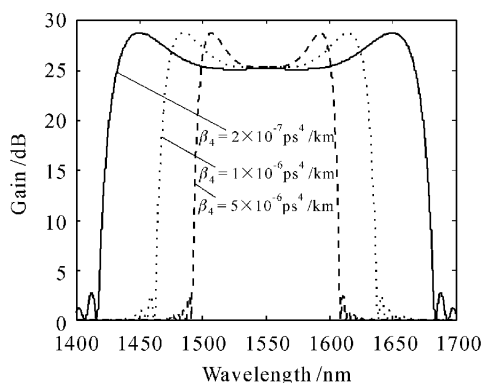


图 4 $\beta_2 = 0.001 \text{ ps}^2/\text{km}$, 不同 β_4 值情况下, 光纤参量放大器第一段光纤输出端的小信号增益

Fig. 4 When $\beta_2 = 0.001 \text{ ps}^2/\text{km}$, gain of small signals at the FOPA output with different β_4

为了满足相位匹配条件, 抽运波长一般选择在高非线性光纤的零色散波长 λ_0 的附近。在 λ_0 的附近, β_2 的值比较小, 在这种情况下, β_4 对放大器增益的贡献不能再忽略。图 4 给出了零色散波长 λ_0 为 1550 nm, 两抽运功率为 1 W, 波长分别为 1540 nm 和 1560 nm, $\gamma = 20 \text{ km}^{-1}/\text{W}$, $\beta_2 = -0.01 \text{ ps}^2/\text{km}$, $L = 100 \text{ m}$ 时, 光纤参量放大器第一段高非线性光纤输出端的小信号增益谱图。从图 4 可以看出, 光纤

参量放大器的增益带宽和平坦性都受 β_4 的影响, β_4 变大, 带宽变窄, 在有效的带宽内, 增益的平坦性能也变差。

在假定光纤参量放大器的其他参数不变的情况下, β_2 取不同的值来考察其对光纤参量放大器增益的影响。当 $L = 100 \text{ m}$, $\gamma = 20 \text{ km}^{-1}/\text{W}$, β_4 取 $1.8 \times 10^{-6} \text{ ps}^4/\text{km}$, 两抽运功率为 1 W 时, 得到光纤参量放大器的增益与 β_2 的关系如图 5 所示。从图 5 可知, 在考虑 β_4 影响的前提下, 随着 β_2 从反常色散区过渡到正常色散区, 光纤参量放大器的增益带宽逐渐变小, 但增益的起伏也有一定的改善。

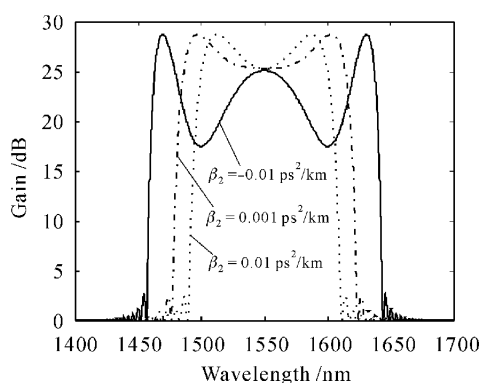


图 5 $\beta_4 = 1.8 \times 10^{-6} \text{ ps}^4/\text{km}$, 不同 β_2 值情况下, 光纤参量放大器第一段光纤输出端的小信号增益

Fig. 5 When $\beta_4 = 1.8 \times 10^{-6} \text{ ps}^4/\text{km}$, gain of small signals at the first-section HNLF of FOPA with different β_2

5 结 论

从一组耦合方程出发, 导出了双抽运三段高非线性光纤级联光纤参量放大器在小信号时的增益表达式。抽运光的功率、波长, 以及高非线性光纤的非线性系数、色散系数、光纤长度等参数都会影响光纤参量放大器的增益及其带宽, 通过仔细调节这些参数, 光纤参量放大器可以得到理想的增益和带宽。在仿真分析中, 主要分析了抽运光功率、高非线性光纤的长度及其色散特性对光纤参量放大器增益的影响。研究表明, 光纤参量放大器的增益随抽运功率增大以及光纤长度增加而增大。与文献[19]比较, 考虑了光纤二阶色散和四阶色散的影响。

参 考 文 献

- 1 Kyo Inoue. Four-wave mixing in an optical fiber in the zero-dispersion wavelength region [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1992, 10(11):1553~1560
- 2 M. Yu, G. P. Agrawal, C. J. McKinstrie. Pump-wave effects

- on the propagation of noisy signals in nonlinear dispersive media [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1995, **12**(6):1126~1132
- 3 Li Qiliang, Zhu Haidong, Li Yuanmin *et al.*. Cross-phase modulational sideband instability in wavelength-division-multiplexing system with periodic lumped amplifiers [J]. *Acta Physica Sinica*, 2005, **54**(6):2686~2693
李齐良,朱海东,李院民等. 集总式放大波分复用链路中交叉相位调制的边带不稳定性[J]. *物理学报*, 2005, **54**(6):2686~2693
- 4 Wang Qing, Wang Yan, Jiang Qiaofeng *et al.*. Nonlinear coefficient and dispersion parameters measurement utilizing optical parametric amplification [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(1):75~78
王青,王燕,蒋俏峰等. 利用参量放大效应测量光纤的非线性系数和色散参数[J]. *中国激光*, 2005, **32**(1):75~78
- 5 R. H. Stolen, J. E. Bjorkholm. Parametric amplification and frequency conversion in optical fibers [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1982, **QE-18**(7):1062~1071
- 6 Lin Hongrong, Qian Sheng, Yang Aixia *et al.*. Effect of the fiber dispersion parameter on the performance of average-soliton transmission system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(9):1274~1278
林洪榕,钱胜,杨爱霞等. 光纤色散参量对光孤子系统传输性能的影响[J]. *光学学报*, 2004, **24**(9):1274~1278
- 7 Yanyong Wang, Huanmin Bao, Xiaojun Jiang *et al.*. Ultra-low noise C-band erbium-doped fiber preamplifier [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2005, **3**(1):6~7
- 8 J. Hansryd, P. A. Andrekson, M. Westlund *et al.*. Fiber-based optical parametric amplifiers and their applications [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2002, **8**(3):506~520
- 9 Kyo Inoue. Polarization effect on four-wave mixing efficiency in a single-mode fiber [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1992, **28**(4):883~894
- 10 K. K. Y. Wong, M. E. Marhic, K. Uesaka *et al.*. Polarization-independent one-pump fiber optical parametric amplifier [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2002, **14**(11):1506-1508
- 11 K. K. Y. Wong, M. E. Marhic, K. Uesaka *et al.*. Polarization-independent two-pump fiber optical parametric amplifier [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2002, **14**(7):911~913
- 12 F. Yaman, Q. Lin, Govind P. Agrawal. Effects of polarization-mode dispersion in dual-pump fiber-optic parametric amplifiers [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2004, **16**(2):431~433
- 13 G. P. Agrawal (Jia Dongfang, Yu Zhenhong, Tan Bin *et al.* translated). *Nonlinear Fiber Optics, Third Edition & Applications of Nonlinear Fiber Optics* [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2002. 166~168, 245~248
G. P. Agrawal 著,贾东方,余震虹,谈斌等译. *非线性光纤光学原理及应用*[M]. 北京:电子工业出版社, 2002. 166~168, 245~248
- 14 Laurent Provino, Arnaud Mussot, Eric Lantz *et al.*. Broadband and flat parametric amplifiers with a multisection dispersion-Tailored nonlinear fiber arrangement [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2003, **20**(7):1532~1537
- 15 C. J. McKinstrie, S. Radic, A. R. Chraplyvy. Parametric amplifiers driven by two pump waves [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2002, **8**(3):538~547
- 16 M. E. Marhic, OSA Frank S. Yang, Min-Chen Ho *et al.*. High-nonlinearity fiber optical parametric amplifier with periodic dispersion compensation [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1999, **17**(2):210~215
- 17 Mingyi Gao, Chun Jiang, Weisheng Hu *et al.*. Two pump fiber optical parametric amplifiers with three-section fibers allocation [J]. *Optics & Laser Technol.*, 2006, **38**(4):186~191
- 18 Wen Zhang, Chengao Wang, Jianwei Shu *et al.*. Design of fiber-optical parametric amplifiers by genetic algorithm [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2004, **16**(7):1652~1654
- 19 Mingyi Gao, Chun Jiang, Weisheng Hu *et al.*. Optimized design of two-pump fiber optical parametric amplifier with two-section nonlinear fibers using genetic algorithm [J]. *Opt. Exp.*, 2004, **12**(23):5603~5613