

文章编号: 0253-2239(2005)10-1329-5

强脉冲信号在光纤参变放大器中的放大特性研究

曹 辉^{1,2} 孙军强^{1*} 陈国杰² 陈伟成² 黄德修¹

(¹ 华中科技大学光电子工程系, 武汉 430074
² 佛山科学技术学院理学院物理学系, 佛山 528000)

摘要: 考虑到抽运损耗、走离、色散和非线性等效应,用分步傅里叶方法求解耦合的非线性薛定谔方程组,就强脉冲信号在连续光抽运光纤参变放大器中的放大情况进行了理论研究。研究表明,强脉冲信号除经历振幅放大,脉冲时域展宽等过程外,还会发生令人感兴趣的脉冲分裂现象,即一个脉冲信号分裂为两个子脉冲。而且即使在连续光抽运的情况下,走离效应对强脉冲信号的放大也产生了显著影响,即促使两个子脉冲振幅不等以及脉冲漂移。最后,强脉冲信号独特的放大特性用光纤参变放大器的饱和增益特性做了很好的解释,并指出脉冲分裂现象在信号抽样、脉冲压缩、光时分复用系统中有潜在用途。

关键词: 光通信; 光纤参变放大器; 分步傅里叶方法; 脉冲信号; 脉冲分裂

中图分类号: TN913.7 文献标识码: A

Investigation on the Amplification of Strong Pulse Signal in Fiber Optical Parametric Amplifiers

Cao Hui^{1,2} Sun Junqiang¹ Chen Guojie² Chen Weicheng² Huang Dexiu¹

(¹ Department of Optoelectronics Engineering, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan 430074)
(² Department of Physics, Foshan University, Foshan 528000)

Abstract: Considering pump depletion, walk-off effect, dispersion and nonlinear effect on pulses propagating inside optical fibers, amplification of intense pulse signal in fiber optical parametric amplifiers (FOPA) are numerically studied by solving the coupled nonlinear Schrödinger equations with split-step Fourier method. Calculation results showed that, except amplitude amplification and temporal width broadening, a very interesting phenomenon occurred that is one signal pulse splitting into two sub-pulses. Further, even if in the case of continuous wave pumped, walk-off does have distinct effect on the amplification of strong pulse signal, leading to amplitude difference for two sub-pulses and pulse shift. At last, the unique strong pulse signal amplification characteristics are finely explained by saturated gain properties of FOPA, and the potential applications of pulse splitting phenomenon in pulse compression, signal sampling and time-division multiplex system are pointed out as well.

Key words: optical communications; fiber optical parametric amplifier; split-step Fourier method; pulse signal; pulse splitting

1 引 言

光纤参变放大器以其宽带宽、高增益、可实现波长转换、光开关、光脉冲生成等功能近年来倍受关注^[1~4]。无论单光源抽运还是双光源抽运,人们对于连续信号光的放大特性都进行了很深入的研究^[5,6]。但要实现光纤参变放大器在光通信系统中的应用,脉冲信号的放大特性研究是必不可少的。

虽然已有相关实验报道^[7],小信号近似下脉冲光信号与连续光信号的放大特性可视为一致,但这些研究局限于线性放大的情况,并没有考虑增益饱和的情况。事实上,随着高非线性光纤、高功率半导体激光器、高输出功率掺铒光纤放大器(EDFA)的出现和普遍采用,光纤参变放大器(FOPA)非常容易工作在饱和增益区。光纤参变放大器增益饱和时,增

作者简介: 曹 辉(1973~),男,湖南益阳人,佛山科学技术学院物理系副教授,华中科技大学博士研究生,主要从事光纤通信中非线性效应和光有源、无源器件的研究。E-mail: caohui@fosu.edu.cn

* * 通信联系人。E-mail: jqsun@mail.hust.edu.cn

收稿日期: 2004-08-27; 收到修改稿日期: 2005-02-04

益将随信号功率的增加(减小)而减小(增加)^[8]。因此脉冲信号在线性增益区和饱和增益区的放大特性将存在显著差异。而且即使在连续光抽运的情况下走离效应对脉冲信号的放大也可能产生一定的影响,本文拟就强脉冲信号在连续光抽运光纤参变放大器中的放大特性进行研究。

2 求解非线性薛定谔方程

基于简并的四波混频效应的光纤参变放大器,其抽运光、信号光和共轭的闲频光的传播可用以下耦合的非线性薛定谔方程(NLSE)来描述^[9,10]:

$$\frac{\partial A_p}{\partial z} = -\frac{i}{2}\beta_{2p}\frac{\partial^2 A_p}{\partial T^2} - \frac{1}{2}\alpha_p A_p + i\gamma\{[|A_p|^2 + 2(|A_s|^2 + |A_I|^2)]A_p + 2A_s A_I A_p^* \exp(i\Delta\beta z)\}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial A_s}{\partial z} = -d_s \frac{\partial A_s}{\partial T} - \frac{i}{2}\beta_{2s}\frac{\partial^2 A_s}{\partial T^2} - \frac{1}{2}\alpha_s A_s + i\gamma\{[|A_s|^2 + 2(|A_I|^2 + |A_p|^2)]A_s + A_I^* A_p^2 \exp(-i\Delta\beta z)\}, \quad (2)$$

$$\frac{\partial A_I}{\partial z} = -d_I \frac{\partial A_I}{\partial T} - \frac{i}{2}\beta_{2I}\frac{\partial^2 A_I}{\partial T^2} - \frac{1}{2}\alpha_I A_I + i\gamma\{[|A_I|^2 + 2(|A_s|^2 + |A_p|^2)]A_I + A_s^* A_p^2 \exp(-i\Delta\beta z)\}, \quad (3)$$

其中 $A_j(t, z)$, $j=p, s, I$ 分别是抽运光、信号光和闲频光电场的慢变复振幅, $\alpha_p \approx \alpha_s \approx \alpha_I \approx \alpha$ 为光纤损耗系数, $\Delta\beta = \beta(\omega_s) + \beta(\omega_I) - 2\beta(\omega_p)$ 为线性传播常量失配, T 为随抽运光以群速度 v_p 移动的参考系中的时间量度 ($T = t - z/v_p$), 走离参量 $d_j = v_p^{-1} - v_j^{-1}$ ($j=s, I$) 分别代表脉冲信号、闲频脉冲与抽运光之间的群速度失配, γ 为非线性系数, z 为光场在光纤参变放大器中传播的距离。这里假定三个光波的非线性系数相同, 且忽略拉曼增益。非线性薛定谔方程右边四项分别表示走离、色散、吸收损耗和非线性效应。

强脉冲信号输入将引起抽运光与信号光(闲频光)间能量大幅度转移, 必须考虑抽运损耗, 这种情况下非线性薛定谔方程不存在解析解。为了理论研究强脉冲信号在光纤参变放大器中的放大情况, 可通过数值方法求解非线性薛定谔方程。对基于高非线性色散位移光纤的光纤参变放大器, 各参量取典型值: 抽运光功率 $P_{p0} = 1600$ mW, $\gamma = 0.017$ km⁻¹ · mW⁻¹, $\alpha = 0.05$ km⁻¹, 光纤长度 $L = 300$ m, 零色散波长 $\lambda_0 = 1550$ nm, 零色散波长处色散斜率 $dD/d\lambda = 0.03$ ps/nm² (D 为色散参量), 近零色散波长连续光抽运, 且抽运光波长位于反常色散区, $\lambda_p = 1551$ nm, $\beta_{2p} \approx 0$ ps²/km, 信号光和闲频光的载波频率在光纤参变放大器增益带宽内, 满足 $2\omega_p = \omega_s + \omega_I$, 且分别位于反常和正常色散区, $\lambda_s = 1566$ nm, $\lambda_I = 1536$ nm, $d_s = d_I = -30$ ps/km, $\beta_{2s} = -\beta_{2I} = -20$ ps²/km, 按时间等距抽样的强高斯脉冲为

$$A_s(T_i, 0) = \sqrt{P_{s0}} \exp\left(-\frac{T_i^2}{2T_0^2}\right), \quad (4)$$

$$i = 1, 2, \dots, 128$$

其中脉冲峰值功率 $P_{s0} = 1$ mW, 脉冲半宽度 $T_0 = 10$ ps(相对于强度的 $1/e$ 而言), $-5T_0 \leq T_i \leq 5T_0$, 相应地, 连续的抽运光和初始值为零的闲频光抽样为

$$A_p(T_i, 0) = \sqrt{P_{p0}}, \quad A_I(T_i, 0) = \sqrt{P_{I0}}, \quad (5)$$

$$i = 1, 2, \dots, 128$$

其中抽运光功率 $P_{p0} = 1600$ mW, 闲频光功率 $P_{I0} = 0$ (意味着输入端无闲频光输入, 但闲频光将随光场在光纤中的传播而很快产生)。

按照上述参量将(4)式、(5)式代入到(1)式~(3)式, 采用分步傅里叶方法, 同时为了在给定步长情况下提高计算精度, 非线性算子采用龙格-库塔方法迭代求解, 得到强信号脉冲和闲频脉冲在光纤参变放大器中的演变情况如图1(a)、图1(b)所示。粗略地, $z = 100$ m可作为线性增益区和非线性增益区的分界点, 由图1(c)可知它同时也是抽运光是否出现明显损耗的分界点。在线性增益区, 脉冲信号被几乎无形变地放大, 而在非线性增益区, 在 $z < 150$ m时, 脉冲信号被放大的同时时域脉宽被展宽。但当 $z > 150$ m时, 发生了较特殊的现象, 那就是一个脉冲分裂成两个子脉冲, 称之为脉冲分裂现象。此外, 应当注意到两个子脉冲的峰值并不相等, 输入脉冲前沿形成的子脉冲峰值较输入脉冲后沿形成的子脉冲峰值明显要小。而且两个子脉冲不是关于输入脉冲峰值位置($T_i = 0$)对称, 而是相对输入脉冲峰值向后漂移。

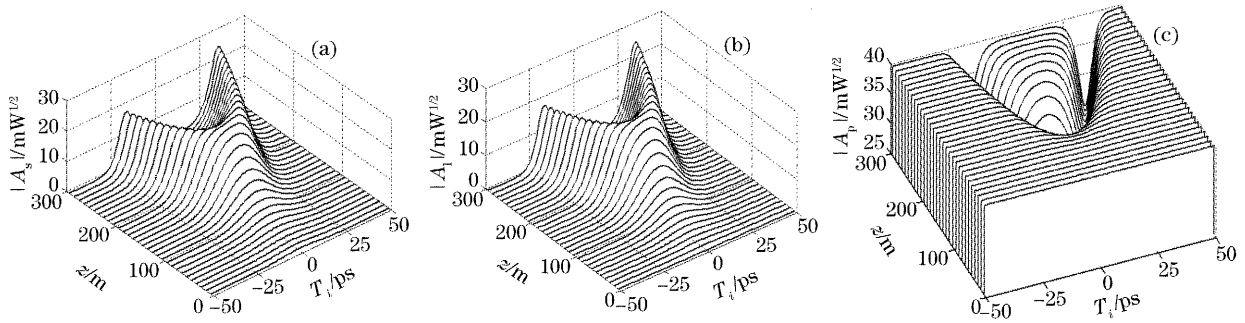


图 1 (a)强信号脉冲,(b)闲频光脉冲,(c)连续的抽运光在光纤参变放大器中的演变情况(各参量为: $L=300\text{ m}$,

$$P_{s0}=1\text{ mW}, P_{p0}=1600\text{ mW}, \beta_{2p}=0, \beta_{2s}=-\beta_{2i}=20\text{ ps}^2/\text{km}, \gamma=17\text{ W}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}, d_s=d_i=-30\text{ ps}/\text{km}$$

Fig. 1 Evolution of (a) strong signal pulse, (b) idler pulse, (c) continuous pump wave in FOPA. Parameters are

$$L=300\text{ m}, P_{s0}=1\text{ mW}, P_{p0}=1600\text{ mW}, \beta_{2p}=0, \beta_{2s}=-\beta_{2i}=20\text{ ps}^2/\text{km}, \gamma=17\text{ W}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}, d_s=d_i=-30\text{ ps}/\text{km}$$

3 理论分析

首先,假设走离效应是造成两个子脉冲峰值不相等和脉冲漂移的原因。为此,在非线性薛定谔方程中令 $d_s=d_i=0$,即忽略走离效应而保持其他参量不变,再次用分步傅里叶方法求解,得到忽略走离效应情况下的强信号脉冲和闲频脉冲在光纤参变放

大器中的演变情况如图 2(a)、图 2(b)所示,与图 1 相比,同样发生了明显的脉冲分裂现象,二者的区别在于图 2 中两个子脉冲的峰值相等,且两个子脉冲关于输入脉冲峰值位置对称分布,这充分说明了两个子脉冲峰值不相等及向后漂移是由走离效应引起的。而图 2(c)给出了连续的抽运光振幅变化情况。

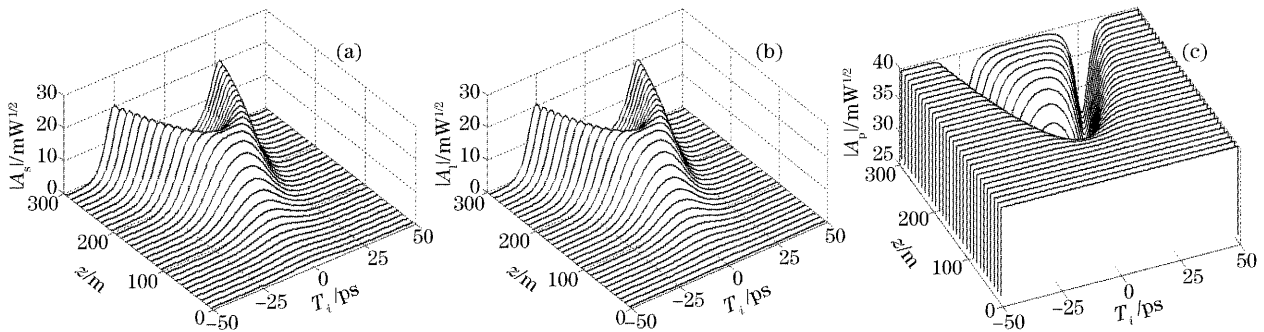


图 2 (a)强信号脉冲,(b)闲频光脉冲,(c)连续的抽运光在光纤参变放大器中的演变情况

(除 $d_s=d_i=0\text{ ps}/\text{km}$ 外,各参量与图 1 相同)

Fig. 2 Evolution of (a) strong signal pulse, (b) idler pulse, (c) continuous pump wave in FOPA

(as in Fig. 1 but with $d_s=d_i=0\text{ ps}/\text{km}$)

其次,分析产生脉冲分裂现象的原因。实际上,同时考虑到脉冲信号其瞬时功率随时间变化的特点以及光纤参变放大器增益饱和与输入信号功率相关的特性,脉冲分裂现象就不难理解。忽略走离效应,图 3 给出了信号光为连续波时信号增益随信号输入功率的变化情况,可见,当光纤参变放大器取上述参量时,若信号输入功率在 1 mW 左右变化,则信号输入功率越大信号获得的增益反而越小,光纤参变放大器工作在增益饱和区。另一方面,基于四波混频的光纤参变过程其内在的物理机理是克尔效应,可认为是瞬间完成的,而高斯型脉冲信号输入意味着不同时刻光纤参变放大器的信号输入功率不同,因

此根据图 3 可知,信号输入功率随时间的变化将导致信号输出功率随时间的变化。图 4 给出了(4)式所示的高斯型脉冲信号输入时,一个周期内信号增益和信号输出功率的变化曲线。由图 4 中的实线可知,随着输入功率由 0 到 1 mW 变化,光纤参变放大器首先工作在线性增益区,表现为信号增益不随信号输入功率的变化而变化,但随着信号输入功率的进一步增加,光纤参变放大器开始工作在增益饱和区,表现为信号增益随信号输入功率的增加而减小,当输入功率为 1 mW ($T_i=0$) 时,信号增益仅为 3.9 dB 。因此,如图 4 中虚线所示,在输入功率由 0 增加到 1 mW 的过程中,输出功率将经历一个峰值,

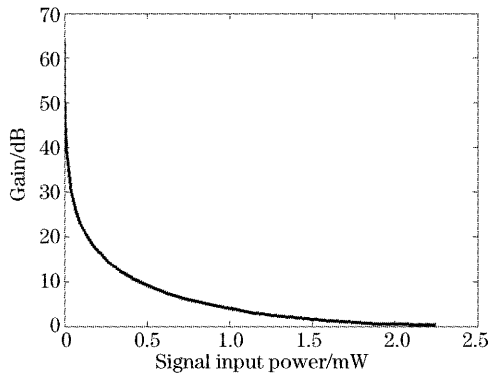


图 3 信号光为连续光时增益随信号输入功率的变化情况
Fig. 3 Gain as a function of signal input power in case of continues signal wave input

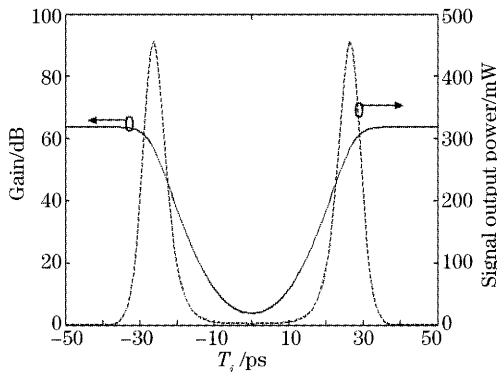


图 4 强高斯脉冲信号输入时的信号增益和信号输出功率曲线

Fig. 4 Signal gain and signal output power profiles for a strong Gaussian signal pulse inserted

同样,在输入功率由 1 mW 减小到 0 的过程中,输出功率也将经历一个峰值,从而一个强高斯脉冲输入导致两个子脉冲输出。可见,脉冲分裂现象是由三方面因素引起的:1)强脉冲导致光纤参变放大器增益饱和;2)脉冲输入导致输入信号功率随时间变化;3)光纤参变放大器增益饱和时信号增益随信号输入功率增加而减小。

进一步,需要分析走离效应是怎样导致子脉冲峰值差异和子脉冲漂移的。众所周知,光纤参变放大器的最大信号输出功率是由抽运功率决定的,且最大信号输出功率随抽运功率的增加而增加。计算示例中走离参量为负,表示抽运光群速度大于信号光(闲频光)群速度,脉冲信号相对抽运光是向后移动的,对于连续光抽运,输入脉冲后沿获得的抽运光功率较前沿始终要高些,因为在脉冲信号相对抽运光后移过程中,输入脉冲前沿对应的抽运光已经在抽运输入脉冲后沿时消耗了一定的能量,从而导致输入脉冲后沿获得的增益和输出功率高于输入脉冲

前沿。而且由于走离参量 $d_s = d_1 = -30$ ps/km,意味着脉冲信号、闲频信号载波的群速度低于抽运光群速度,因此在以抽运光群速度 v_p 移动的参考系中,脉冲信号相对抽运光是向后漂移的。反之,如果走离参量 d_s 和 d_1 大于零,则脉冲信号相对抽运光将向前漂移。

此外,根据抽运光和信号光(闲频光)之间能量耦合随光纤长度周期性变化的特点,预计脉冲分裂现象将随光纤长度的增加而周期性地发生。为此,取 $z = 550$ m,且保持图 1 中其他参量不变,再次求解非线性薛定谔方程,得到长 550 m 的高非线性光纤中强高斯脉冲和闲频脉冲的传播情况如图 5(a)、图 5(b)所示,显然,发生了两次脉冲分裂现象。而且由于传

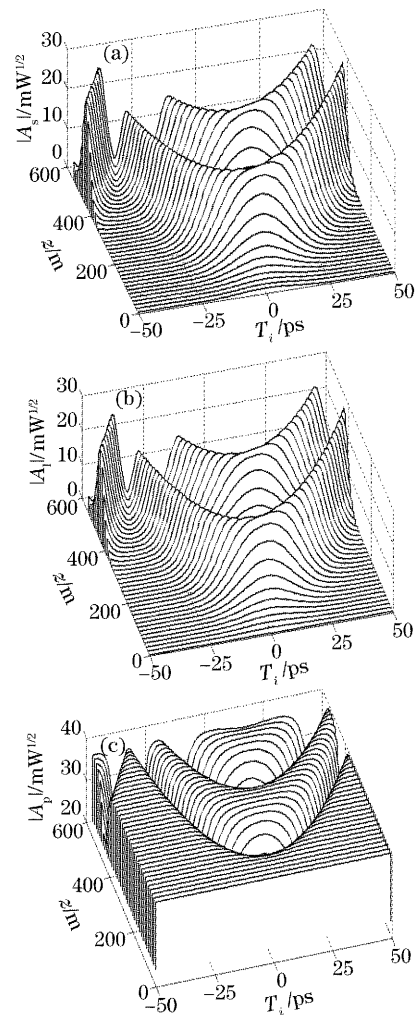


图 5 (a)强信号脉冲,(b)闲频光脉冲,(c)连续的抽运光在光纤参变放大器中的演变情况(除 $L = 550$ m 外,各参量与图 1 相同)

Fig. 5 Evolution of (a) strong signal pulse, (b) idler pulse, (c) continuous pump wave in FOPA (as in Fig. 1 but with $L = 550$ m)

播距离长, 走离效应更明显, 甚至一个脉冲周期中的子脉冲因走离而漂移进入了另一个脉冲周期。而图 5(c) 给出了连续的抽运光振幅变化情况。

4 脉冲分裂的潜在应用

图 6 比较了输入高斯脉冲和输出端一个子脉冲的脉冲宽度, 输出子脉冲在获得 28.8 dB 增益的同时, 脉宽也被压缩了 3.7 倍, 可见脉冲分裂现象可很好地用于脉冲压缩。而且一个脉冲分裂为两个脉冲这一现象在信号抽样、光脉冲生成、光时分复用系统中具有潜在用途。

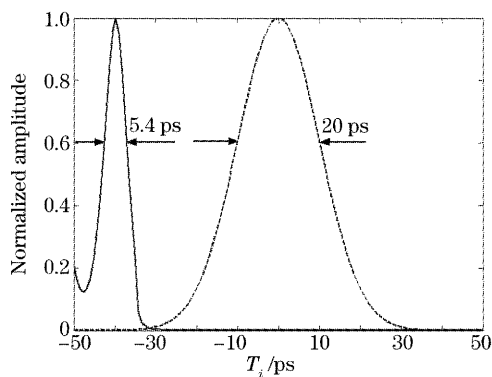


图 6 脉冲形状比较(实线为 $z=550$ m 处脉冲分裂形成的子脉冲, $2T_0=5.4$ ps; 虚线为 $z=0$ 处输入的高斯脉冲, $2T_0=20$ ps)

Fig. 6 Comparison of pulse shape (Solid curve: the sub-pulse formed in signal pulse splitting with $z=550$ m, $2T_0=5.4$ ps, dashed curve: the incident Gaussian pulse with $z=0$, $2T_0=20$ ps)

5 结 论

脉冲信号在线性增益区和饱和增益区的放大特性存在显著差异, 强脉冲信号除经历振幅放大、脉冲

时域展宽等过程外, 还会发生脉冲分裂现象, 而且即使在连续光抽运的情况下, 走离效应也对强脉冲信号的放大产生了显著影响, 促使子脉冲漂移及两个子脉冲振幅不等, 其有利的一面是使一个子脉冲获得更大的增益和输出功率。总之, 强脉冲信号输入时光纤参变放大器具有的这些独特的放大特性是由其饱和增益特性决定的。

参 考 文 献

- 1 Islam M N, Boyraz O. Fiber parametric amplifiers for wavelength band conversion [J]. *IEEE J. Selected Topics in Quant. Electron.*, 2002, **8**(3): 527~537
- 2 Hansryd J, Andrekson P A. O-TDM demultiplexer with 40-dB gain based on a fiber optical parametric amplifier [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2001, **13**(7): 732~734
- 3 Hansryd J, Andrekson P A. Wavelength tunable 40 GHz pulse source based on fiber optical parametric amplifier [J]. *Electron. Lett.*, 2001, **37**(9): 584~585
- 4 Liu Hongjun, Chen Guofu, Zhao Wei *et al.*. Study on the bandwidth of three wave mixing optical parametric amplifiers [J]. *Chin. J. Lasers*, 2002, **A29**(8): 680~686 (in Chinese)
- 刘红军, 陈国夫, 赵卫等. 三波混频光参量放大器中带宽的研究 [J]. *中国激光*, 2002, **A29**(8): 680~686
- 5 Cao Hui, Sun Junqiang, Zhang Xingliang *et al.*. Optimized design of the fiber length for fiber optical parametric amplifier [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(8): 1085~1090 (in Chinese)
- 曹辉, 孙军强, 张新亮等. 光纤参变放大器光纤长度的优化设计 [J]. *光学学报*, 2004, **24**(8): 1085~1090
- 6 Wong K K Y, Marhic M E, Uesaka K *et al.*. Polarization-independent two-pump fiber optical parametric amplifier [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2002, **14**(7): 911~913
- 7 Wong K K Y, Shimizu K, Uesaka K *et al.*. Continuous-wave fiber optical parametric amplifier with 60-dB gain using a novel two-segment design [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2003, **15**(12): 1707~1709
- 8 Cao Hui, Sun Junqiang, Chen Guojie *et al.*. Analytical expressions for saturated signal gain and output power of fiber optical parametric amplifiers [C]. *Proc. SPIE*, 2003, **5280**: 737~744
- 9 Agrawal G P. *Nonlinear Fiber Optics* [M]. 2nd edition, New York: Academic, 1995. chap 10
- 10 Wabnitz S, Soto-Crespo J M. Stable coupled conjugate solitary waves in optical fibers [J]. *Opt. Lett.*, 1998, **23**(4): 265~267