

光纤损耗对抽运消耗光纤参变过程的影响分析

安俊鸽 武保剑 李 智 马辉栋

(电子科技大学光纤传感与通信教育部重点实验室, 四川 成都 611731)

摘要 在各向同性高非线性光纤中同时考虑光纤损耗和抽运消耗对单抽运四波混频参变过程的影响, 得到了导波光之间功率转化关系所满足的椭圆方程, 计算结果与 OptiSystem 软件仿真的结果一致。利用该椭圆方程分析了基于四波混频的全光 2R 再生器的性能, 研究表明, 光纤损耗系数的增加不但会劣化再放大性能, 还会分别减小和增加高低电平上的输入噪声容限。

关键词 非线性光学; 光纤参变过程; 全光 2R 再生; 光纤损耗; 椭圆方程

中图分类号 O437.4 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.0619001

Influence of Fiber Loss on Optical Parametric Process with Pump Depletion

An Junge Wu Baojian Li Zhi Ma Huidong

(Key Laboratory of Optical Fiber Sensing and Communications, Ministry of Education, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 611731, China)

Abstract The influences of fiber loss and pump depletion on single-pump four-wave mixing (FWM) parametric process in the isotropic and highly-nonlinear optical fiber are considered. The power conversion relation of the guided optical waves is expressed by an elliptic equation, and the calculated results are consistent with the simulation datum obtained by OptiSystem software. The elliptic equation is also used to analyze the performance of all optical 2R regenerators based on FWM. The research shows that the increase of fiber loss coefficient can not only deteriorate the re-amplifying performance, but also lead to the decrease and increase of noise tolerances of input high and low levels, respectively.

Key words nonlinear optics; fiber parametric process; all-optical 2R regeneration; fiber loss; elliptic equation

OCIS codes 190.4380; 230.2285; 190.4360; 070.4340

1 引 言

光纤参变过程是一种基于光纤中四波混频(FWM)的非线性效应, 通常采用一个或两个激光器作为抽运光源。在适当的波长设置和相位匹配条件下, 抽运光能量可有效转移到信号光上, 从而实现光纤参变光放大(FOPA)功能, 进而还可以构成光纤参变振荡器(FOPO)。FOPO 具有较高的参变增益、快速的响应时间以及波长连续可调等优势, 不但能够用于全光时钟提取^[1~3], 还可以实现光放大^[4~6]、信号产生^[7]和波长转换^[8,9]等, 在光纤通信、光子信息处理等领域有广泛的应用前景^[10~13]。目

前, 人们对光纤中的非线性效应已有较为深入的研究^[14], 利用光纤参变过程就可以测定高非线性光纤的非线性系数以及光纤色散等^[15]。关键问题是如何对光纤参变过程中各种参数进行优化设计。人们通常针对光脉冲和准连续波两种情形, 对光纤中导波光的非线性耦合模传播方程分别进行数值仿真或解析分析。采用 OptiSystem、VPI 和 Matlab 等软件可执行较全面的数值仿真, 但时间效率不高, 参数之间的依赖关系难以把握, 因此往往还需要借助于解析的理论分析。

在实际光纤参变分析中, 必须考虑三种基本因

收稿日期: 2011-11-09; **收到修改稿日期**: 2011-12-13

基金项目: 国家 973 计划(2011CB301703)和新世纪优秀人才支持计划(NCET-08-0092)资助课题。

作者简介: 安俊鸽(1987—), 女, 硕士研究生, 主要从事光通信方面的研究。E-mail: anjunge_work@163.com

导师简介: 武保剑(1970—), 男, 博士, 教授, 主要从事光通信方面的研究。E-mail: bjwu@uestc.edu.cn

(通信联系人, 中国光学学会会员号: S040111641S)

素:1)光纤损耗,2)光纤色散,3)自相位调制、交叉相位调制和四波混频等非线性效应。高非线性光纤比一般通信所用光纤有更大的损耗系数,在理论分析中忽略光纤损耗势必会造成理论与实验结果的差异,尤其是在功率相关的实验测试中。通常只有在准连续波近似下,才能得到非线性耦合模方程的解析解,而且往往只给出忽略抽运消耗和光纤损耗的光纤参变过程的解析表达式^[16]。而忽略抽运消耗必然限制着相应解析解的适用范围,更何况实际中很难辨明什么功率电平或参数配置下才能按无抽运消耗情形处理。本文将针对“任意抽运消耗”情形下 FWM 参变过程中光纤损耗问题展开讨论。首先从有抽运消耗和光纤损耗的单抽运 FWM 非线性耦合模方程出发,给出抽运光、信号光和闲频光之间的功

率转化关系;推导出光功率演化遵从的椭圆方程解析表达式,通过 OptiSystem 仿真表明结果的正确性;并分析了光纤损耗对全光 2R 再生的功率传递函数“S”型曲线的影响,研究了光纤损耗对输入信号噪声容限的影响。

2 光纤参变过程的解析分析

对于各向同性高非线性光纤中单抽运光纤参变过程,当考虑光纤损耗、光纤色散以及自相位调制、交叉相位调制和四波混频等非线性效应时,准连续波线偏振光的复振幅 $A_j(z) = \sqrt{P_j(z)} \exp[i\phi_j(z)]$ ($j=1,3,4$ 分别为抽运光、信号光和闲频光)满足如下非线性耦合模方程组^[17]:

$$-i\left(\frac{dA_1}{dZ} + \frac{\bar{\alpha}}{2}A_1\right) = (|A_1|^2 + 2|A_3|^2 + 2|A_4|^2)A_1 + 2A_3A_4A_1^* \exp(i\Delta\beta Z/\gamma), \quad (1a)$$

$$-i\left(\frac{dA_l}{dZ} + \frac{\bar{\alpha}}{2}A_l\right) = (|A_l|^2 + 2|A_1|^2 + 2|A_k|^2)A_l + A_1^2A_k^* \exp(-i\Delta\beta Z/\gamma), \quad (1b)$$

式中 $l=3,4;k=7-l$; $\Delta\beta = \beta_3 + \beta_4 - 2\beta_1$ 为波矢失配; $Z = \gamma z$, z 为传播方向坐标; $\bar{\alpha} = \alpha/\gamma$, γ 和 α 分别为光纤非线性系数和损耗系数。于是, $\bar{\alpha}Z = \alpha z$ 。

将(1a)式和(1b)式的两边分别同时乘以 A_1^* 和 A_l^* 可得

$$-i\left(\frac{dA_1}{dZ}A_1^* + \frac{\bar{\alpha}}{2}P_1\right) = P_1(2P_0 - P_1) + 2P_1 \sqrt{P_3P_4} \exp(i\theta), \quad (2a)$$

$$-i\left(\frac{dA_l}{dZ}A_l^* + \frac{\bar{\alpha}}{2}P_l\right) = P_l(2P_0 - P_l) + P_l \sqrt{P_3P_4} \exp(-i\theta), \quad (2b)$$

式中 $\theta = \Delta\beta Z/\gamma + \phi_3 + \phi_4 - 2\phi_1$, ϕ_j 为 $A_j(z)$ 的相位; $P_0 = P_1 + P_3 + P_4$ 为总功率, $P_j = |A_j|^2$ 代表功率。

取(2a)式和(2b)式的虚部,可得如下功率关系:

$$\frac{dP_1}{dZ} + \bar{\alpha}P_1 = -2\left(\frac{dP_3}{dZ} + \bar{\alpha}P_3\right) = -2\left(\frac{dP_4}{dZ} + \bar{\alpha}P_4\right) = -4P_1 \sqrt{P_3P_4} \sin \theta, \quad (3)$$

引入一个随 z 变化的参变 x , 并将各导波光的功率表示为如下形式:

$$P_1 = (P_{10} - 2x) \exp(-\bar{\alpha}Z), \quad P_3 = (P_{30} + x) \exp(-\bar{\alpha}Z), \quad P_4 = (P_{40} + x) \exp(-\bar{\alpha}Z), \quad (4)$$

它们满足(3)式所表示的功率关系, $P_{j0} = P_j(z=0)$ 为输入的导波光功率。

取(2a)式和(2b)式的实部,还可以得相位角 ϕ_j 满足的方程:

$$\frac{d\phi_1}{dZ} = 2P_0 - P_1 + 2P_1 \sqrt{P_3P_4} \cos \theta, \quad (5)$$

$$\frac{d\phi_l}{dZ} = 2P_0 - P_l + 2P_l \sqrt{P_3P_4} \cos \theta, \quad (6)$$

式中 θ 满足方程:

$$\frac{d\theta}{dZ} = \frac{\Delta\beta}{\gamma} + 2P_1 - P_3 - P_4 + P_1 \sqrt{P_3P_4} (P_3^{-1} + P_4^{-1} - 4P_1^{-1}) \cos \theta, \quad (7)$$

由(3)式和(4)式得到

$$\frac{d\theta}{dZ} = \frac{d\theta}{dx} \frac{dx}{dZ} = \frac{d\theta}{dx} \exp(\bar{\alpha}Z) 2P_1 \sqrt{P_3P_4} \sin \theta = -2P_1 \sqrt{P_3P_4} \exp(\bar{\alpha}Z) \frac{d \cos \theta}{dx}, \quad (8)$$

由(7)式和(8)式并代入 $-\frac{1}{2} \frac{dP_1}{dx} = \frac{dP_3}{dx} = \frac{dP_4}{dx} = \exp(-\bar{\alpha}Z)$ 得到

$$\frac{\Delta\beta}{\gamma} + 2P_1 - P_3 - P_4 + 2\exp(\alpha Z) \frac{d}{dx}(P_1 \sqrt{P_3 P_4} \cos \theta) = 0, \quad (9)$$

对(9)式两边进行 x 的积分,得到

$$\left(\frac{\Delta\beta}{\gamma} + \Delta P_0\right)x - 3x^2 \exp(-\alpha Z) + 2\exp(\alpha Z)P_1 \sqrt{P_3 P_4} \cos \theta = K_1, \quad (10)$$

由参变 $x(z)$ 满足的椭圆方程解析表达式:

$$\frac{dx}{dz} = \gamma \exp(\alpha z) 2P_1 \sqrt{P_3 P_4} \sin \theta = \gamma \exp(\alpha z) 2P_1 \sqrt{P_3 P_4 (1 - \cos^2 \theta)} = 2\gamma \sqrt{h(x)}, \quad (11)$$

联立(10)和(11)消去 θ ,得到

$$h(x) = \exp(-2\alpha z)(P_{10} - 2x)^2(P_{30} + x)(P_{40} + x) - 0.25[K_1 - (\Delta\beta/\gamma + \Delta P_0)x + 3x^2 \exp(-\alpha z)]^2, \quad (12)$$

$$K_1 = 2P_{10} \sqrt{P_{30} P_{40}} \cos(\phi_{30} + \phi_{40} - 2\phi_{10}), \quad (13a)$$

$$\Delta P_0 = 2P_{10} - P_{30} - P_{40}. \quad (13b)$$

根据(11)式,可以数值计算出光纤参变过程中导波光功率的转化规律,再由(4)~(7)式计算相位角 ϕ_i ,从而可以确定各导波光的复振幅。由于(11)式同时考虑了抽运消耗和光纤损耗的影响,更加符合实际情况,所以具有更加广泛的适用性;而且该方程的求解无需采用复杂的有限时域差分法、分步傅里叶法等仿真方法^[18],因此时间效率高,参数之间的依赖关系容易把握等。如果进一步深入研究,借助于数学手册还可以从椭圆方程得到 $x(z)$ 的解析表达式,这样整个光纤参变过程的参数之间的关系就更加清晰了,计算速度也会得到进一步提升。对于忽略光纤损耗和抽运消耗的情形,可以得到闲频光最大转换增益的解析表达式为

$$G_{i,\max}(z) = |\sinh(\gamma P_{p0} z)|^2, \quad (14)$$

所得结果与文献[16]完全一致。

但需指出的是,(11)式只考虑了抽运光、信号光和闲频光三个光波之间的非线性功率转化过程,没有考虑高功率抽运时可能出现高阶四波混频产物的

情形。而且由于本文研究的是准连续波,即色散因素可以忽略的情形,因此(1)式只能应用于分析低速率信号的再生。

3 理论结果分析

对于计及传播损耗和抽运消耗的一般情形,(11)式难以给出解析解。本文采用数值方法求解,并与 OptiSystem 仿真结果进行比较,说明本文结果的正确性。为了给将来实验提供参考,计算中所用的光纤参数取自实验室中已有的高非线性光纤,即光纤损耗 $\alpha=0.9$ dB/km,光纤长度 $L=0.1$ km,非线性系数 $\gamma=11$ W⁻¹/km,色散 $D=-0.14$ ps/(nm·km),色散斜率 $S=0.02$ ps/(nm²·km)。此外,抽运光和信号光的波长分别取为 1550.0 nm 和 1548.4 nm。

图 1 给出了简并四波混频过程的 OptiSystem 仿真系统,低功率的连续波光源经光放大后作为抽运光,然后与较低功率的信号光一起耦合进高非线性光纤,所产生的闲频光通过光滤波器滤出,并用光

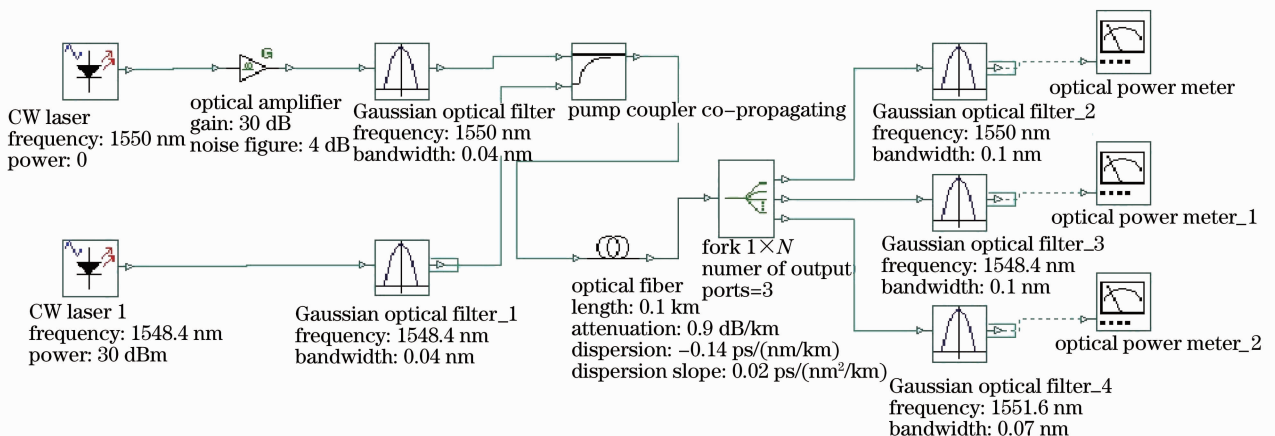


图 1 光纤参变过程的 OptiSystem 仿真系统

Fig. 1 OptiSystem simulation system for optical fiber parametric process

功率计测量其功率。闲频光功率 P_4 随输入信号功率 P_{30} 的变化规律如图 2 所示,其中输入的抽运光功率 P_{10} 为 30 dBm。由图 2 可以看出,根据(11)式数值计算的结果与 OptiSystem 仿真结果一致。可见,当光纤参变过程中高阶四波混频可以忽略时,(11)式能够用于分析光纤损耗对抽运消耗参变过程的影响。从中还可以看出光纤损耗对功率及曲线饱和特性的影响。因此,在功率的测量公式中考虑光纤损耗因素是十分必要的。

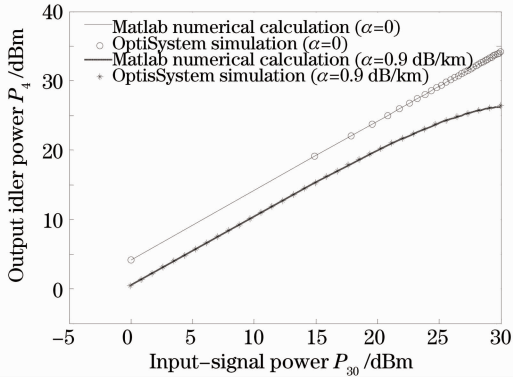


图 2 数值计算结果与 OptiSystem 仿真的比较
Fig. 2 Comparison of numerical results and OptiSystem simulation

4 光纤损耗对参变转移特性的影响

光纤 FWM 的全光 2R 再生器是参变过程在光

子信息处理领域有重要应用,其再生性能取决于输出闲频光与输入信号光之间的“S”型功率转移函数关系,需要考虑参变过程中抽运消耗的影响。图 3 给出了光脉冲的整形过程,其中“S”型功率转移曲线由(11)式数值计算得到,计算参数与图 2 相同。由图 3 可以看出,非线性光纤损耗系数越大,“S”型功率转移曲线压缩得越多,从而影响再放大功能。然而,仅凭这一点还不能完全客观评价全光 2R 再生器的性能,因为 2R 再生器还包括整形的功能,即抑制“0”和“1”电平上的幅度抖动,同时使脉冲上升沿或下降沿变得尽可能陡峭。实际上,调节全光 2R 再生器中的光放大单元也会缩放功率转移曲线。因此,采用归一化“S”转移曲线来评价全光 2R 再生器的再生性能。对于任意给定的“S”型功率转移曲线,考察输出闲频光信号“0”和“1”电平上相对幅度抖动为 10% 时(以所能达到的最大输出闲频光功率 P_{max} 为基准)相应输入光信号的幅度抖动(噪声)容限。实际中,输出相对幅度抖动的大小需要根据全光 2R 再生器的应用场合不同加以确定。图 4 给出了非线性光纤损耗系数对输入信号幅度抖动(噪声)容限的影响。可见,随着损耗系数的增加,高低电平上的输入噪声容限分别减小和增加。当光纤的损耗系数从 0 dB/km 变化到 2 dB/km 时,信号“0”电平上的噪声容限变化率为 12.5 mW/(dB/km),信号“1”电

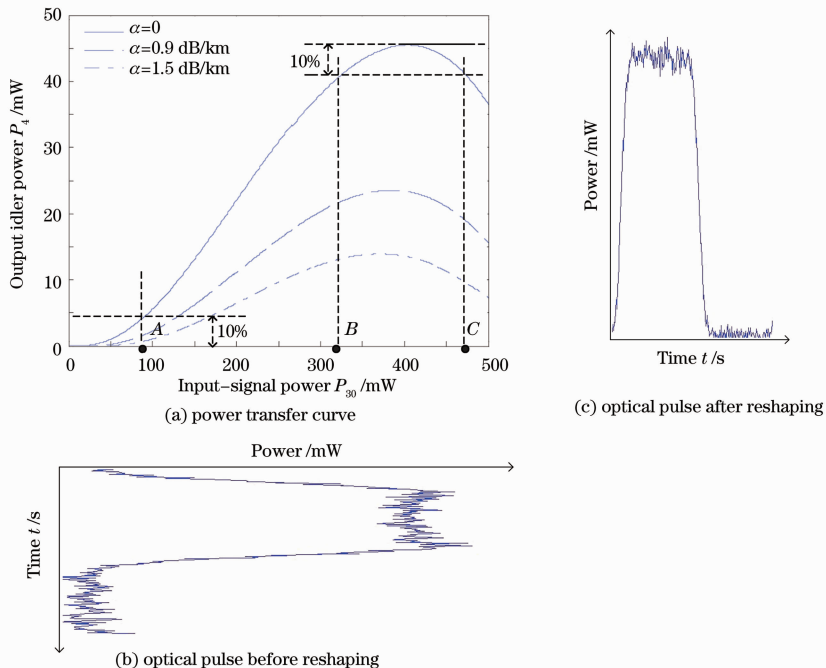


图 3 基于光纤 FWM 的全光 2R 再生器的光脉冲整形过程

Fig. 3 Re-shaping process of optical pulse for all-optical FWM-based 2R regenerator

上的噪声容限上限变化率为 $-30.5 \text{ mW}/(\text{dB}/\text{km})$,下限变化率为 $-14 \text{ mW}/(\text{dB}/\text{km})$ 。当取实验室的高非线性光纤的损耗系数 $\alpha=0.9 \text{ dB}/\text{km}$ 时,“0”和“1”电平上的噪声容限分别为 $0\sim 102 \text{ mW}$ 和 $314\sim 449 \text{ mW}$ 。

这意味着,使用全光 2R 再生器时,待整形的输入信号光脉冲峰值功率不但要调整到适当的噪声容限范围内,而且高低电平上的噪声大小也要匹配,这样才能达到所要求的输出抖动和消光比性能。

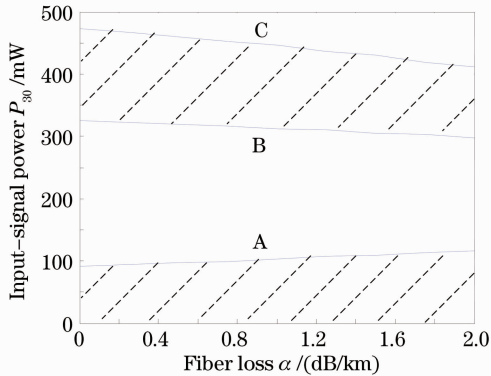


图4 光纤损耗系数对输入光信号幅度抖动(噪声)容限的影响

Fig. 4 Influence of fiber loss coefficient on the amplitude jitter (noise) tolerance of input signal

5 结 论

研究了非线性光纤损耗和抽运消耗对各向同性高非线性光纤中 FWM 参变过程的影响。采用椭圆方程形式,解析地表达了单抽运光纤参变过程的功率转化规律,与 OptiSystem 软件仿真的结果一致。利用该椭圆方程分析了基于四波混频的全光 2R 再生器的功率转移特性,提出采用归一化功率转移曲线来评价全光 2R 再生器整形性能的方法;据此,分析非线性光纤损耗系数对输入信号抖动容限的影响。研究表明,随着光纤损耗系数的增加,高低电平上的输入噪声容限分别减小和增加。因此,在设计光纤参变 2R 再生器时,对非线性光纤的损耗系数也应该有所考虑。

参 考 文 献

- 1 J. E. Sharping. Microstructure fiber based optical parametric oscillators [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2008, **26** (14): 2184~2191
- 2 G. K. L. Wong, S. G. Murdoch, R. Leonhardt *et al.*. High-conversion-efficiency widely-tunable all-fiber optical parametric oscillator[J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(6): 2947~2952
- 3 Y. Zhou, K. K. Y. Cheung, S. Yang *et al.*. Widely-tunable picosecond optical parametric oscillator using highly nonlinear fiber[J]. *Opt. Lett.*, 2009, **34**(7): 989~991
- 4 Han Bingchen, Yu Jinlong, Luo Jun *et al.*. Experimental

- research on dual wavelength all-optical decision based on fiber-optical parametric amplifier [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(6): 1576~1580
- 韩丙辰,于晋龙,罗俊等.利用光参变放大同时实现双波长全光判决的实验研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(6): 1576~1580
- 5 Han Bingchen, Yu Jinlong, Luo Jun *et al.*. Multi-channel all-optical non-return-to-zero to return-to-zero format converter based on fiber optical parametric amplifier[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(11): 2962~2965
- 韩丙辰,于晋龙,罗俊等.基于光纤光参变放大的多通道全光非归零/归零码转换器[J]. *中国激光*, 2009, **36**(11): 2962~2965
- 6 K. S. Abedin, J. T. Gopinath, E. P. Ippen *et al.*. Highly nondegenerate femtosecond four-wave mixing in tapered microstructure fiber [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2002, **81**(8): 1384~1386
- 7 A. Chen, G. Wong, S. Murdoch *et al.*. Widely tunable optical parametric generation in a photonic crystal fiber[J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(7): 762~764
- 8 T. Andersen, K. Hilligse, C. Nielsen *et al.*. Continuous-wave wavelength conversion in a photonic crystal fiber with two zero dispersion wavelengths [J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(17): 4113~4122
- 9 R. Jiang, R. Saperstein, N. Alic *et al.*. 375 THz parametric translation of modulated signal from 1550 nm to visible band[C]. Anaheim: Optical Fiber Communication Conference, 2006, PDP16
- 10 M. J. Holmes, D. L. Williams, R. J. Manning. Highly nonlinear optical fiber for all optical processing applications[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1995, **7**(9): 1045~1047
- 11 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
- 12 Yang Hongwu, Sun Junqiang, Du Qiuqiao. All-optical frequency up-conversion utilizing high nonlinear fiber in radio over fiber system[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(6): 1448~1453
- 杨洪武,孙军强,杜秋皎.光纤无线通信系统中用高非线性光纤实现全光频率上转换[J]. *中国激光*, 2009, **36**(6): 1448~1453
- 13 Du Jianxin. Degenerate four-wave-mixing noise in dispersion managed wavelength-division-multiplexed system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(9): 2361~2367
- 杜建新.色散管理波分复用系统中的简并四波混频噪声[J]. *光学学报*, 2009, **29**(9): 2361~2367
- 14 G. P. Agrawal. *Nonlinear Fiber Optics* [M]. 3rded, Singapore: Elsevier Pte Ltd, 2005
- 15 Wang Qing, Wang Yan, Jiang Yunfeng *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,蒋荫峰等.利用参变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
- 16 M. E. Marhic. *Fiber Optical Parametric Amplifiers, Oscillators and Related Devices* [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2008
- 17 J. Hansryd, P. A. Andrekson, M. Westlund. Fiber based optical parametric amplifiers and applications [J]. *IEEE Sel. Top. Quantum Electron.*, 2002, **8**(3): 506~520
- 18 G. P. Agrawal. *Principle and Applications of Nonlinear Fiber Optics* [M]. Jia Dongfang, Yu Zhenghong Transl.. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2003
- G. P. Agrawal. *非线性光纤光学原理及应用* [M]. 贾东方,余震虹译.北京:电子工业出版社, 2003