

文章编号: 0258-7025(2007)07-0940-05

利用半导体光放大器和滤波器组合实现 高速波长转换和码型转换

董建绩¹, 张新亮¹, 丁 园¹, 沈 平², 黄德修¹

(¹ 华中科技大学武汉光电国家实验室, 湖北 武汉 430074; ² 南洋理工大学网络技术研究中心, 新加坡 637553)

摘要 将半导体光放大器(SOA)和滤波器组合使用是实现高速全光信号处理的有效途径。利用半导体光放大器和带宽为0.32 nm的可调窄带滤波器同时实现了40 Gbit/s的非归零(NRZ)信号的反相波长转换(WC)和非归零到伪归零(PRZ)信号的码型转换,波长转换和码型转换的结果差异取决于滤波器中心波长相对于探测光波长的失谐量。当滤波器的失谐量为 -0.24 nm时,输出反相的波长转换,此时滤波器起到加速半导体光放大器增益恢复的功能。当滤波器失谐量为 $+0.41$ nm和 -0.48 nm时,得到非归零到伪归零的码型转换,并且产生的伪归零脉冲分别出现在非归零信号的上升沿和下降沿,此时滤波器的作用是将探测光的相位信息转换为强度信息,并且该码型转换结果兼有波长转换的功能。

关键词 光通信;半导体光放大器;瞬态交叉相位调制;波长转换;码型转换

中图分类号 TN 929.11 **文献标识码** A

High Speed Wavelength Conversion and Format Conversion Based on Semiconductor Optical Amplifier and Optical Filter

DONG Jian-ji¹, ZHANG Xin-liang¹, DING Yuan¹, P. Shum², HUANG De-xiu¹

¹Wuhan National Laboratory for Optoelectronics,

Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China

²Network Technology Research Centre, Nanyang Technological University, Singapore, 637553, Singapore

Abstract It is a promising approach to achieving high-speed all-optical signal processing based on the combination of semiconductor optical amplifier (SOA) and optical bandpass filter (OBF). The inverted wavelength conversion (WC) of the nonreturn to zero (NRZ) and the format conversion from NRZ to pseudo return to zero (PRZ) are demonstrated synchronously based on single SOA and an optical bandpass filter with 0.32 nm bandwidth. The conversion results depend on the OBF detuning as respect to the probe carrier. When the OBF detuning is -0.24 nm, the output will be the inverted WC and the filter is used to accelerate the SOA gain recovery. When the detuning is $+0.41$ and -0.48 nm, the output result will be the NRZ to PRZ format conversion and the generated PRZ pulses appear at the leading edge and trailing edge of the NRZ signal respectively. The filter completes phase modulation to intensity modulation conversion. The converted PRZ signal realizes wavelength conversion as well.

Key words optical communication; semiconductor optical amplifier; transient cross phase modulation; wavelength conversion; format conversion

收稿日期: 2006-12-26; **收到修改稿日期**: 2007-03-05

基金项目: 国家 863 计划(2006AA03Z0414)、国家自然科学基金(60577007)、湖北省杰出青年人才基金(2006ABB017)和教育部新世纪优秀支持人才计划(NCET-04-0715)资助项目。

作者简介: 董建绩(1979—),男,湖北人,博士研究生,主要从事光通信器件、高速全光信号处理(全光波长转换、码型转换、全光逻辑等)方面的研究。E-mail:jjdong@mail.hust.edu.cn

导师简介: 张新亮(1971—),男,湖北人,教授,博士生导师,目前主要从事基于半导体光放大器的全光信号处理和微波光子学方面的研究。E-mail:xlzhang@mail.hust.edu.cn

1 引言

全光波长转换器能够将一个光波长所携带的信息转换到另一个波长上,是未来密集波分复用(DWDM)光网络中的关键器件,而全光码型转换器则是连接未来密集波分复用系统和高速光时分复用(OTDM)系统的必备器件^[1]。近年来,全光码型转换技术^[2~4]比较常见的方案是基于半导体光放大器(SOA)的非线性环境,能够实现的码型转换有非归零(NRZ)和归零(RZ)之间的转换^[5, 6],归零和载波抑制归零码(CSRZ),非归零和载波抑制归零码之间的转换^[7]。另外利用保偏光纤环镜也可以得到非归零到伪归零(PRZ)的码型转换^[8]。但转换速率均未超过10 Gbit/s。

虽然半导体光放大器较慢的增益恢复时间(约100 ps)使其在40 Gbit/s以上的高速光通信系统中难以得到应用^[9],但是利用半导体光放大器的瞬态交叉相位调制(T-XPM)效应辅助以窄带滤波器是一种新颖的加速半导体光放大器增益恢复、实现高速波长转换的有效途径^[10]。其关键技术是把高速脉冲信号和一路连续的探测光同时注入半导体光放大器,由于高速脉冲信号对载流子的消耗,使得探测光在半导体光放大器内产生瞬时非线性相移,再利用窄带滤波器滤出探测光的蓝移频率分量或者红移频率分量,从而实现高速波长转换^[11~15]。鉴于半导体光放大器和滤波器的组合使用在高速光通信系统的优势,本文提出并实验验证了40 Gbit/s的非归零信号的波长转换和非归零到伪归零的码型转换,两种转换结果取决于滤波器中心波长相对于探测光波长的不同失谐量。该方案结构简单,只需单个半导体光放大器和一个窄带滤波器,而且具有高速信号处理的能力。

2 工作原理

图1为基于半导体光放大器和窄带滤波器的高速波长转换和码型转换的原理示意图。一束波长为 λ_{cw} 的连续光(作为探测光)和一束波长为 λ_s ,调制速率为40 Gbit/s的非归零(NRZ)信号光耦合后注入到半导体光放大器,由于信号光注入半导体光放大器后会导致探测光的增益和相位发生急剧变化,进而使得探测光的光谱展宽,出现了蓝移和红移频率分量。假设位于半导体光放大器输出端的光滤波器(OBF)的中心波长为 $\lambda_0 = \lambda_{cw} + \Delta\lambda_{det}$, $\Delta\lambda_{det}$ 为滤

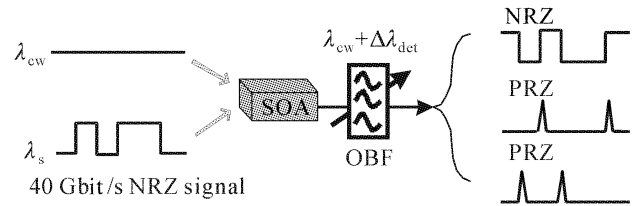


图1 基于半导体光放大器和光滤波器的波长转换和码型转换工作原理

Fig. 1 Operation principle for wavelength conversion and format conversion based on the SOA and OBF

波器中心波长相对于探测光中心波长的失谐量,其正值表示滤波器中心波长的红移或蓝移。这样光滤波器的输出将对应探测光在 $\lambda_{cw} + \Delta\lambda_{det}$ 处的分量。根据光滤波器的失谐量不同,可以获得三种不同的输出结果。当光滤波器中心波长蓝移并且失谐量较小时,输出结果为反相的非归零波长转换;当光滤波器中心波长蓝移并且失谐量较大时,输出结果为伪归零信号,并且输出脉冲对应输入非归零信号的下降沿;当光滤波器中心波长红移并且失谐量较大时,输出结果也为伪归零信号,但是其输出脉冲对应输入非归零信号的上升沿。工作原理为:

探测光在半导体光放大器内部同时受到非归零信号的交叉增益调制(XGM)和交叉相位调制(XPM)效应,但当光滤波器失谐量较小时,探测光载波可以透过光滤波器输出,交叉增益调制占主导作用,所以输出为反相的非归零信号,这和传统的交叉增益调制波长转换有类似之处,但不同的是,传统的交叉增益调制波长转换方案很难实现速率高达40 Gbit/s的波长转换,而本实验之所以能实现40 Gbit/s的波长转换是因为蓝移的光滤波器可以消除载流子浓度恢复较慢引起的码型效应,加速增益恢复过程^[11]。而当光滤波器失谐量较大时,探测光载波受到抑制,由交叉相位调制引起的边带信号可以透过光滤波器输出,由于瞬态啁啾或者频率漂移只发生在非归零的上升沿和下降沿,并且蓝啁啾和红啁啾分别对应非归零的下降沿和上升沿^[16, 17],所以此时光滤波器输出为伪归零信号,并且光滤波器蓝移时输出脉冲对应输入非归零信号的下降沿,光滤波器红移时输出脉冲对应输入非归零信号的上升沿。

3 实验装置

波长转换和码型转换的实验装置如图2所示。

连续探测光由外腔激光器产生,输出波长为 1557.32 nm,输出功率为 0。非归零信号光由可调激光器(TLD)的输出光接入一个马赫-曾德尔调制器(MZM)产生,其中数据信号是通过码型发生器(BPG)加载的,并且调制速率可以实现从 2.5~40 Gbit/s连续可调,可调激光器输出波长的调谐范围为 1527~1563 nm。首先将非归零信号光的输出波长固定为 1563 nm,调制速率固定为 40 Gbit/s,其峰值功率为 5 dBm。两束光经信号耦合(OC1)进入半导体光放大器,由于交叉相位调制效应作用,输出探测光的光谱会展宽。实验采用 Kamelian 公司的半导体光放大器,其偏置电流为 200 mA,小信号增益为 20 dB,饱和输出功率为 10 dBm。第一个可调滤波器(OBF1)的 3 dB 带宽为 0.32 nm,其中心波长和探测光中心波长存在部分偏移,这个偏移量就是 OBF1 的失谐量。根据失谐量的不同,OBF1 对展宽的探测光光谱分量进行滤波。由于 OBF1 的输出功率较弱,故使用掺铒光纤放大器(EDFA)放大输出功率,为了消除掺铒光纤放大器引入的噪声和非归零信号光的串扰,采用另一个 1 nm 带宽的可调滤波器(OBF2)对探测光滤波。其中心波长是和探测光中心波长对准的。最后用光谱分析仪(OSA)和通信信号分析仪(CSA)分别测量输出光的光谱和时域波形。

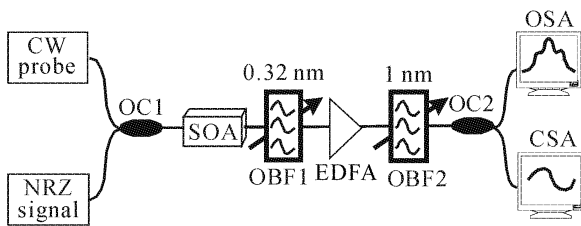


图 2 实验装置图

Fig. 2 Experimental setup

4 实验结果与分析

根据图 2 的实验装置,首先进行 40 Gbit/s 的非归零反相波长转换实验。将输入非归零信号设定成 16 比特“1110110010001010”为一个重复周期的固定编码,其波形如图 3(a)所示。实验过程中,通过调节 OBF1 的失谐量来观察通信信号分析仪的波形变化,进而确定不同输出结果。当调节可调滤波器 OBF1 的中心波长,使得失谐量为 -0.24 nm 时,即 OBF1 中心波长相对探测光中心波长蓝移 0.24 nm,从通信信号分析仪上观察到最佳的反相波长转换的波形,如图 3(b)所示。输出波形和原始非归零波形

反相,并且没有出现码型效应,只是在功率“1”存在一定的噪声。为了和传统的交叉增益调制波长转换方案对比,实验中也测量了当 OBF1 失谐量为 0 时的输出波形,如图 3(c)所示。不难发现输出波形中由于其上升沿比较缓慢,所以出现了严重的码型效应。由此可见,受到半导体光放大器的载流子恢复时间较慢的限制,传统的交叉增益调制波长转换的工作速率很难达到 40 Gbit/s,而本实验方案可以作为一种改进方案,实现 40 Gbit/s 甚至更高速率的波长转换。原因可以分析如下:由于 OBF1 的失谐量较小,在增益恢复过程的某时刻,频率发生漂移的探测光频率对准 OBF1 中心频率,虽然增益未达到最大值,但 OBF1 透过的功率却较大;而当增益完全恢复时,由于探测光载波频率漂移量恢复为零,虽然增益恢复到最大值,但载波的部分光功率被失谐的 OBF1 衰减,所以失谐滤波器使得滤波器输出功率从最低迅速上升到一个稳定值,如果把半导体光放大器及其后的 OBF1 看成一个系统,则从整体上表现为加快了系统的有效增益恢复。图 3 的左边一列是实验测量的波形图,右边一列是对应的输出波形的眼图。

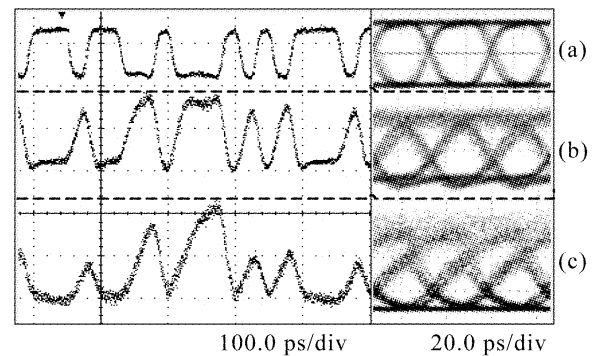


图 3 波长转换中测量的波形图和眼图

(a) 输入非归零信号;(b) OBF1 蓝移 -0.24 nm 得到的反相波长转换;(c) OBF1 失谐量为 0 得到的反相波长转换

Fig. 3 Waveforms and eye patterns of the wavelength conversion

(a) waveform of input NRZ signal; (b), (c) waveforms of converted signal when the detuning is -0.24 and 0 nm, respectively

利用图 2 中非归零信号波长的可调谐性,实验测量了不同非归零信号波长下的转换光眼图,如图 4 所示,此时 OBF1 的失谐量保持不变。图 4(a)~(d)分别对应 $\lambda_s = 1560$ nm, 1550 nm, 1540 nm 和 1530 nm,测量其输出消光比分别为 8.8 dB, 6.9 dB, 5.9 dB, 4.1 dB。从眼图也可以看出随着信号光波长的变短,输出眼图的眼睛张开度(EOR)变

小,输出信号劣化较严重,尤其是图 4(d)中眼图几乎闭合。为了研究转换光信号质量和信号光波长的关系,测量了输出消光比随信号光波长的变化情况,如图 5 所示。输入消光比在整个 C 波段内的波动范围为 4~9 dB,而输入的非归零信号消光(ER)比为 11.2 dB,显然该方案波长转换存在消光比退化的缺点,但长波长处获得的消光比仍高于短波长处的,这是由半导体光放大器增益谱非对称性决定的。

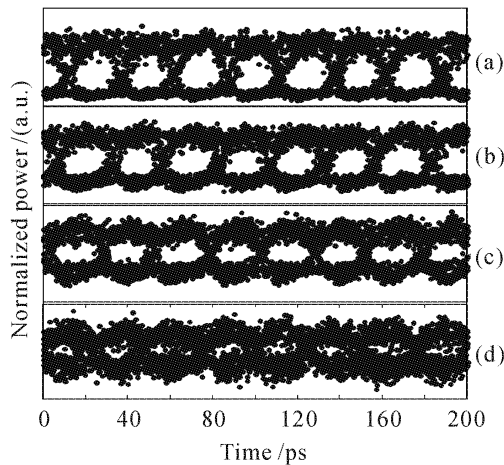


图 4 波长转换中输出的眼图
波长光信号为(a) 1560 nm, (b) 1550 nm,
(c) 1540 nm, (d) 1530 nm

Fig. 4 Eye patterns of the wavelength conversion from (a) to (d), the signal wavelengths are 1560, 1550, 1540, and 1530 nm, respectively

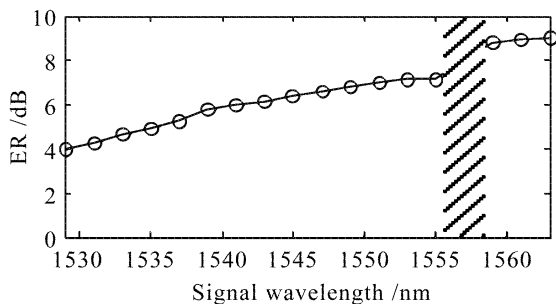


图 5 输出消光比随信号光波长的变化情况
Fig. 5 Output extinction ratio as a function of the
signal wavelength

根据图 2 的实验装置,进行 40 Gbit/s 的非归零到伪归零的码型转换实验。将非归零信号的输出峰值功率调节到 7 dBm,当调节 OBF1 的失谐量为 +0.41 nm 或者 -0.48 nm 时,在输出端观测到伪归零信号,分别如图 6(b)和(c)所示。输入的非归零波形如图 6(a)所示。值得注意的是,当失谐量为 +0.41 nm 时,产生的伪归零脉冲对应非归零信号的上升沿,而失谐量为 -0.48 nm 时,伪归零脉冲对应非归零信号的下降沿。原因就是探测光在非归零

的上升沿和下降沿分别产生负啁啾(红移)和正啁啾(蓝移)分量,用适当失谐量的红移/蓝移滤波器正好可以将这个瞬时相位信息转换为强度信息,从而实现非归零到伪归零的转换。

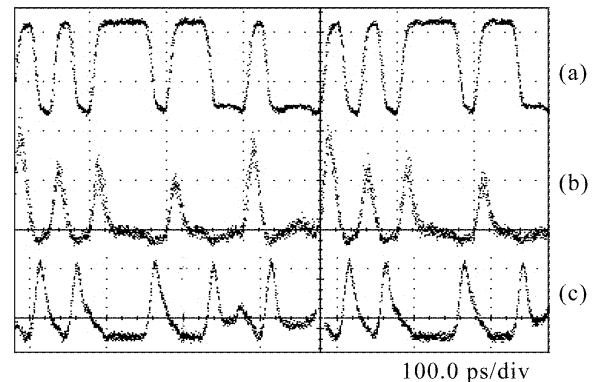


图 6 从非归零到伪归零码型转换的实验结果
(a) 输入非归零信号的波形图;(b)和(c)当滤波器失谐量
分别为 +0.41 nm 和 -0.48 nm 时得到的伪归零信号的波形
Fig. 6 Experimental results of the NRZ-to-PRZ
format conversion

(a) waveform of the input NRZ signal; (b), (c) waveforms of converted PRZ signal when the detuning is +0.41 and -0.48 nm, respectively

实验中,非归零信号的速率具有连续可调功能,研究不同调制速率下的码型转换情况。图 7 为不同速率下得到的码型转换的眼图,其中(a)~(c)分别对应 10 Gbit/s, 20 Gbit/s 和 40 Gbit/s。左列为输入非归零信号光眼图,中列为 OBF1 红移得到的转换伪归零眼图,右列为 OBF1 蓝移得到的转换伪归零眼图。可以看出 OBF1 红移得到的伪归零眼图质量优于 OBF1 蓝移得到的结果,从图 7 右列看出,输出信号的功率“1”的噪声很大,而功率“1”的幅度却较低,使得输出眼图的眼睛张开度较小。究其原因,受输入非归零信号的调制,半导体光放大器内部载流子浓度的变化规律是快速的消耗过程和缓慢的恢复过程,对应的探测光瞬态啁啾变化规律是红移啁啾量大于蓝移啁啾量,而在获得较大失谐量后的滤波器可将这个啁啾信息提取出来转化为强度信息,所以红移滤波器转换出来的伪归零信号质量更好。

由此可见,本实验装置能实现 40 Gbit/s 的反相波长转换和从非归零到伪归零的码型转换。当 OBF1 失谐量为 -0.24 nm 时,得到反相的波长转换,而当 OBF1 失谐量为 +0.41 nm 或者 -0.48 nm 时得到从非归零到伪归零的码型转换。表 1 总结了实验不同条件下得到的不同结果。可以看出输出结果为伪归零码型要求滤波器的失谐量较大,而得到

反相的非归零则要求滤波器失谐量较小,这和前面的原理解释相吻合。

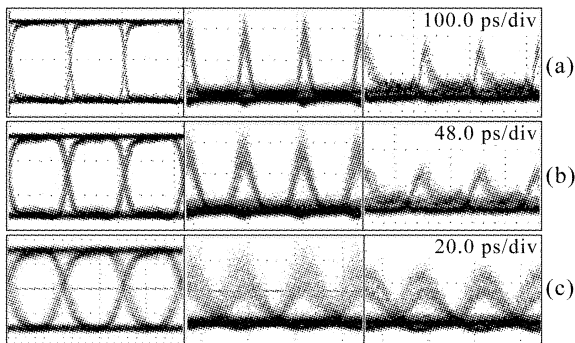


图 7 不同工作速率下码型转换的眼图结果

Fig. 7 Eye patterns of the format conversion at different bit rates

表 1 实验中所用参数及其结果

Table 1 Parameters and results measured in the experiment

Data format	NRZ		
OBF1 detuning /nm	-0.24	-0.48	+0.41
Input peak power /dBm	5	7	7
Output results	Inverted NRZ	PRZ	PRZ

5 结 论

利用半导体光放大器的瞬态交叉相位调制效应辅助以窄带滤波器是改善半导体光放大器超快动态特性、实现高速全光信号处理的有效途径。本文从实验上实现了基于半导体光放大器和窄带滤波器的 40 Gbit/s 非归零信号的全光波长转换和码型转换。

参 考 文 献

- 1 D. Norte, A. E. Willner. Multistage all-optical WDM-to-TDM-to-WDM and TDM-to-WDM-to-TDM data-format conversion and reconversion through 80 km of fiber and three EDFA's [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1995, **7**(11): 1354~1356
- 2 Y. Chang, Y. Lin, J. Chen *et al.*. All-optical NRZ-to-PRZ format transformer with an injection-locked Fabry-Perot laser diode at unslasing condition [J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(19): 4449~4456
- 3 Y. Jeong, H. Lee, H. Yoo *et al.*. All-optical NRZ-to-PRZ converter at 10 Gb/s based on self-phase modulation of Fabry-Perot laser diode [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2004, **16**(4): 1179~1181
- 4 G. Lu, L. Chen, C. Chan. Novel NRZ-to-RZ format conversion with tunable pulsewidth using phase modulator and interleaver [C]. Optical Fiber Communication Conference,

- 2006, JThB32:1~3
- 5 Yan Yumei, Yin Lina, Zhou Yunfeng *et al.*. 10 Gbit/s all-optical non-return-to-zero to return-to-zero conversion based on terahertz optical asymmetric demultiplexer [J]. *Chines J. Lasers*, 2005, **32**(11):1510~1514
闫玉梅,尹丽娜,周云峰等. 利用 TOAD 实现 10 Gbit/s 全光非归零码到归零码的转换[J]. *中国激光*, 2005, **32**(11):1510~1514
- 6 C. Lee, Y. Kim, C. Park *et al.*. Experimental demonstration of 10-Gb/s data format conversions between NRZ and RZ using SOA-loop-mirror [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2005, **23**(2): 834~841
- 7 W. Li, M. Chen, Y. Dong *et al.*. All-optical format conversion from NRZ to CSRZ and between RZ and CSRZ using SOA-based fiber loop mirror [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2004, **16**(1):203~205
- 8 F. Xu, X. Zhang, H. Liu *et al.*. Polarization maintaining fibre loop mirror for NRZ-to-PRZ conversion in all-optical clock recovery [J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2006, **23**(2):355~358
- 9 Dong Jianji, Zhang Xinliang, Huang Dexiu. Experimental and theoretical study on gain dynamics of SOA [J]. *Acta Physica Sinica*, 2005, **54**(2):763~767
董建绩,张新亮,黄德修. SOA 动态增益特性的理论和实验研究[J]. *物理学报*, 2005, **54**(2):763~767
- 10 J. Dong, S. Fu, X. Zhang *et al.*. Analytical solution for SOA-based all-optical wavelength conversion using transient cross phase modulation [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2006, **18**(24):2554~2556
- 11 Y. Liu, E. Tangdiongga, Z. Li *et al.*. Error-free all-optical wavelength conversion at 160 Gb/s using a semiconductor optical amplifier and an optical bandpass filter [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2006, **24**(1):230~236
- 12 Y. Liu, E. Tangdiongga, Z. Li *et al.*. Error-free 320 Gb/s SOA-based wavelength conversion using optical filtering [C]. Optical Fiber Communication Conference, 2006, PDP28:1~3
- 13 M. L. Nielsen, B. Lavigne, B. Dagens. Polarity-preserving SOA-based wavelength conversion at 40 Gbit/s using bandpass filtering [J]. *Electron. Lett.*, 2003, **39**(18):1334~1335
- 14 S. Fu, J. Dong, P. Shum *et al.*. Experimental demonstration of both inverted and non-inverted wavelength conversion based on transient cross phase modulation of SOA [J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(17):7587~7593
- 15 Junyi Zhang, Jian Wu, Kun Xu *et al.*. All-optical wavelength conversion based on nonlinear polarization rotation (NPR) in SOA and AWG filtering [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2006, **4**(4): 205~207
- 16 Dong Jianji, Zhang Xinliang, Huang Dexiu. Chirp characteristics in wavelength converter based on single-port-coupled SOA [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(2):255~258
董建绩,张新亮,黄德修. 基于单端耦合 SOA 的波长转换器啁啾特性分析[J]. *光子学报*, 2005, **34**(2):255~258
- 17 Ye Yabin, Zhen Xiaoping, Zhang Hanyi *et al.*. Chirp performance of converted signal in wavelength conversion based on cross-gain modulation in SOA [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(4):436~440
叶亚斌,郑小平,张汉一等. 基于半导体光放大器中交叉增益调制效应的波长转换啁啾特性的分析[J]. *光学学报*, 2002, **22**(4):436~440