

文章编号: 0258-7025(2009)Supplement 2-0277-05

# 基于半导体光放大器自相位调制和交叉相位调制的色散监测技术

邹良港 宋牟平

(浙江大学信息与电子工程学系, 浙江 杭州 310027)

**摘要** 对于半导体光放大器(SOA),当输入光功率和 SOA 的饱和功率可比拟时,SOA 表现出较强的非线性效应,包括自相位调制(SPM)和交叉相位调制(XPM)。SPM 会使光谱在信号中心频率附近展宽,而 XPM 会在探测光附近产生新频率的光。链路中不同色散值会使输入光的峰值功率产生变化,从而在 SOA 中会产生不同程度的 SPM 和 XPM 效应。通过合理地设置滤波器的中心频率和带宽,同时测量由 SPM 和 XPM 效应产生的频谱变化结果,来达到对链路中残余色散(CD)进行监测的目的,色散监测范围可达 $\pm 30$  ps/nm 以上。该技术可以实现对链路中残余色度色散和偏振模色散(PMD)的监测。

**关键词** 光通信;色散监测;半导体光放大器;自相位调制;交叉相位调制

**中图分类号** TN929.11 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL200936s2.0277

## Dispersion Monitoring Based on Self Phase Modulation and Cross Phase Modulation Effects in Semiconductor Optical Amplifier

Zou Lianggang Song Muping

(Department of Information and Electronic Engineering, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China)

**Abstract** When the input optical power is comparable with the saturated power of the semiconductor optical amplifier (SOA), SOA has a large nonlinearity, including self phase modulation (SPM) and cross phase modulation (XPM). SPM makes the signal's spectrum broaden around the central frequency; XPM produces new frequency parts around the probing light. The different dispersions of the link will change the signal peak power differently, leading to the varied effects of SPM and XPM in SOA. Via effectively setting the central frequency and bandwidth of the filters, the different spectrum changes related to SPM and XPM can be detected simultaneously, in order to monitor the link dispersion, whose range may be over  $\pm 30$  ps/nm. This technique can be used to monitor the residue chromatic dispersion (CD) and polarization mode dispersion (PMD).

**Key words** optical communications; dispersion monitoring; semiconductor optical amplifier; self-phase modulation; cross-phase modulation

### 1 引言

随着光通信系统传输速率的提高和传输距离的增大,链路中的色散对信号质量的影响将越来越明显,如 40 Gb/s 系统的色散容限仅仅是 10 Gb/s 系统的  $1/16$ <sup>[1]</sup>,因此对系统中存在的色散进行动态补偿就显得十分重要。虽然也有学者提出过一些方法,不需要通过色散监测就能直接实现自动补偿<sup>[2]</sup>,但大部分方案中都需要事先实现链路的色散监测。因此色散监测技术是实现高速光通信网络的一个关键。

一种好的色散监测技术应当具备以下两个重要

特性:方案实施比较简易;能应用到常见的几种信号调制格式<sup>[3]</sup>。目前常用的色散监测技术主要有:基于波形分析的监测技术<sup>[4]</sup>、时钟信号分析色散监测技术<sup>[5]</sup>、副载波调制色散监测技术<sup>[6]</sup>,和利用自相位调制(SPM)、交叉相位调制(XPM)、四波混频(FWM)等非线性效应实现监测的技术等<sup>[7~9]</sup>。而采用半导体光放大器(SOA)的非线性效应<sup>[10]</sup>进行色散监测,不仅可以实现全光网络监测系统,而且可以达到微型化、集成化。

SOA 的有源区有效折射率与载流子浓度有关,

**作者简介**: 邹良港(1986—),男,硕士研究生,主要从事光通信监测方面的研究。E-mail: zjuzlg@zju.edu.cn

**导师简介**: 宋牟平(1971—),男,副教授,博士,主要从事新型光子器件、光纤通信/传感方面的研究。

E-mail: songmp@zju.edu.cn

当两个波长的光同时进入 SOA 时,会引起自相位调制、交叉相位调制等非线性效应<sup>[11]</sup>。SOA 色散监测一般采用交叉增益调制(XGM)或自相位调制,本文同时采用 SPM 和 XPM 效应进行监测。在二元相移键控(BPSK)和开关键控(OOK)这两种不同的调制格式下实现了对残余色度色散(CD)和偏振模色散(PMD)的监测。并在一定条件下,可以实现对 PMD 不敏感的 CD 监测。

## 2 色散监测原理

光纤链路中常见的色散包括色度色散和偏振模色散,色散会引起信号波形展宽,峰值功率下降。半导体光放大器作为一个非线性光器件,当输入光功率与 SOA 的饱和功率相比拟时,SOA 会表现出较强烈的非线性效应<sup>[12]</sup>,如 SPM 和 XPM。SPM 会使光谱在信号中心频率附近展宽以及产生红移现象,而 XPM 会使光谱在探测光附近产生新频率的光。这两种效应都和输入光的功率大小有关,由于色散会引起输入光的功率变化,不同的色散值会引起不同的非线性效应<sup>[13]</sup>,因此可以通过对 SPM 和 XPM 的测量实现色散监测。当色散比较小时,信号光波形较窄,峰值功率较大,能引起比较强的 SPM 和 XPM 效应,输出光谱在信号中心频率附近的展宽比较明显,探测光附近新产生光的功率也比较大,通过合理设计带通滤波器,对边带进行滤波,滤出的光功率会比较大。当色散增大时,信号光波形展宽,峰值功率下降,SPM 和 XPM 效应相应地减弱,同样地滤波器滤出的光功率就会变小。如图 1 所示为 BPSK 调制格式下,CD 值分别取 10 ps/nm 和 30 ps/nm 时的 SOA 输出信号频谱图。带通滤波器 OBPF1 和 OBPF2 滤出的是由 SPM 效应引起的频

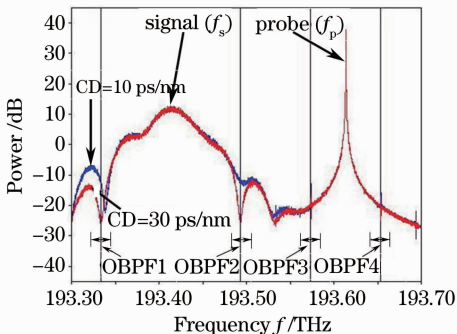


图 1 色度散值取 10 ps/nm 和 30 ps/nm 时的半导体光放大器输出信号频谱图

Fig. 1 Spectrum at SOA outputs with CD valued in 10 ps/nm and 30 ps/nm

谱变化,带通滤波器 OBPF3 和 OBPF4 滤出的是由 XPM 效应引起的频谱变化。可以看出,在这两种 CD 值的条件下,4 个滤波器滤出的光功率都有比较明显的变化。因此通过测量滤波器滤出的光功率与总功率比值的变化,即可测出链路中的色散值。

## 3 方案与结果

图 2 是基于 SOA 的 SPM 和 XPM 效应的色散监测模拟系统,可对 CD 进行监测,也可对 PMD 进行监测。采用中心频率( $f_s$ )为 193.414 THz,峰值功率 4.5 mW,占空比为 33% 的 40 Gb/s RZ-BPSK/OOK 信号;经过色散模拟器后和直流探测光耦合在一起,探测光中心频率( $f_p$ )为 193.614 THz,功率 3.5 mW。耦合后的光通过 SOA 放大,SOA 的饱和功率设定在 20 mW 附近,由于 SOA 的非线性效应,其输出信号频谱发生畸变。输出光通过耦合器分成功率相等的 5 路。其中第 1 路直接通过光功率计测量功率值 PM0,后面 4 路通过不同的带通滤波器滤波后再接入光功率计,测出光功率 PM1~PM4。对 SOA 的输出频谱进行分析之后,选定的 4 个滤波波段分别是  $f_s - 80$  GHz,  $f_s + 80$  GHz,  $f_p - 40$  GHz,  $f_p + 40$  GHz,即 SPM 或 XPM 效应变化比较明显的 4 个波段,滤波器带宽都是 15 GHz。在本方案中,采用 PM1/PM0~PM4/PM0 作为色散监测的监测参量。并通过对比,分析出不同的滤波方案对这两种色散监测结果的差异。

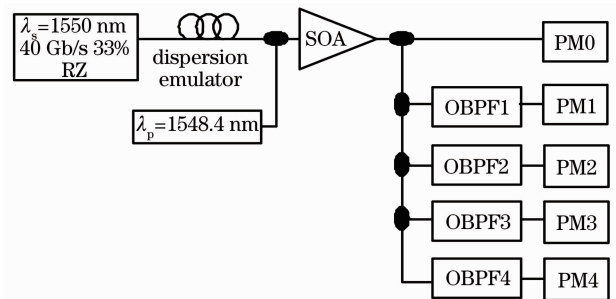


图 2 基于半导体光放大器的色度色散和偏振模色散监测模拟系统

Fig. 2 Simulation setup for CD and PMD monitoring based on SOA

### 3.1 色度色散监测结果

图 3 所示为输入信号以 BPSK 格式调制时的 CD 监测结果曲线。此时保持色散模拟器的 PMD 值为 0。图 3(a)是  $f_s - 80$  GHz 波段和  $f_s + 80$  GHz 波段的测量结果,图 3(b)是  $f_p - 40$  GHz 波段和  $f_p + 40$  GHz 波段的测量结果。对比 4 条曲线,考虑监测

范围和精度,发现在  $f_s + 80$  GHz 处进行滤波测量时,监测效果最好,监测范围达  $\pm 30$  ps/nm。此外,当结合 SPM 和 XPM 的色散监测方案时,可以分辨出 CD 的正负符号。如取  $f_s + 80$  GHz 波段的测量曲线和

$f_p - 40$  GHz 波段的测量曲线,由于两条曲线的对称特性不同,根据在两条曲线上所取得的数值,即可确定此时的 CD 值,包括正负符号。

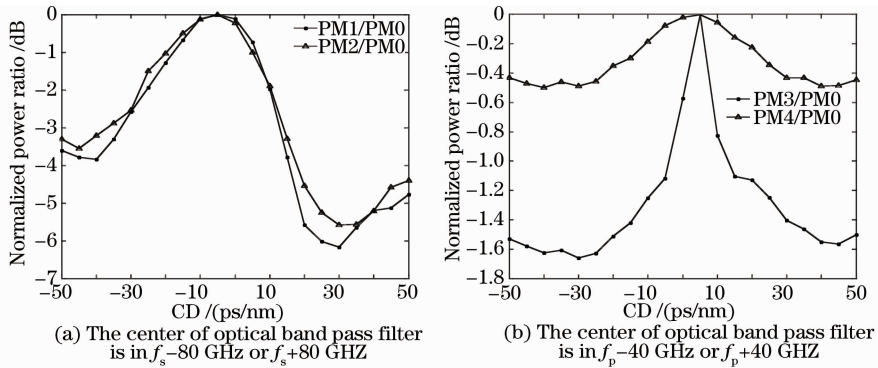


图3 二元相移键控调制时的色度色散监测曲线

Fig. 3 CD monitoring at BPSK modulation format

从图 3(a)可以看出监测曲线并不是中心对称。引起不对称的原因有以下两点:第一是由 SOA 引起的啁啾的影响,如当残余色散是正号时,会给信号引入蓝色啁啾,这将抵消由 SOA 引起的红色啁啾;第二是 SOA 的 SPM 效应不仅会引起信号光谱的展宽,还会引起光谱的红移,在这两种效果的共同作用下,监测曲线会产生偏移。

图 4 所示为输入信号以 OOK 格式调制时的 CD 监测结果曲线。同样保持 PMD 值为 0。图 4(a)是  $f_s - 80$  GHz 波段和  $f_s + 80$  GHz 波段的测量结果,图 4(b)是  $f_p - 40$  GHz 波段和  $f_p + 40$  GHz 波段的测量结果。在  $f_s + 80$  GHz 处监测效果最好,监测范围为  $\pm 40$  ps/nm。同样结合 SPM 和 XPM 的色散监测方案,可以分辨出 CD 的正负符号。

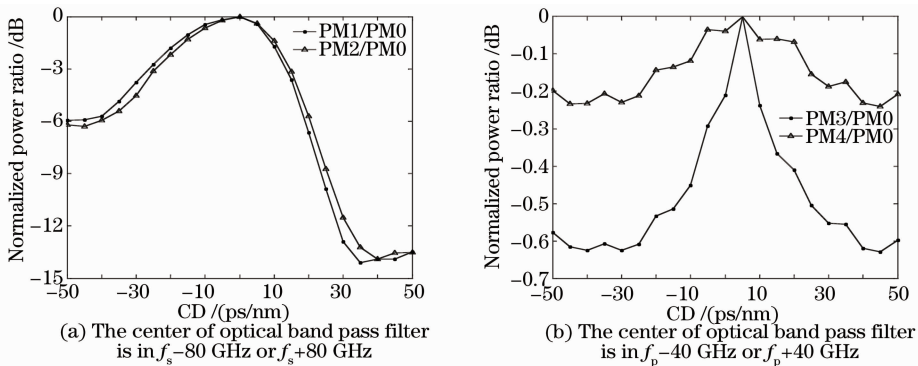


图4 开关键控调制时的色度色散监测曲线

Fig. 4 CD monitoring at OOK modulation format

这里在 BPSK 和 OOK 调制格式下,都能实现 CD 监测,包括 CD 正负符号。BPSK 调制格式下 CD 监测范围可达  $\pm 30$  ps/nm,OOK 调制格式下 CD 监测范围可达  $\pm 40$  ps/nm。对比图 3(a)和图 4(a),采用 SPM 效应时,OOK 格式下的监测结果精度比 BPSK 要高,其监测范围内最大跨度约有 14 dB。对比图 3(b)和图 4(b),采用 XPM 效应时,OOK 格式下的精度比较低。

### 3.2 偏振模色散监测结果

图 5,6 分别表示输入信号以 BPSK,OOK 格式调

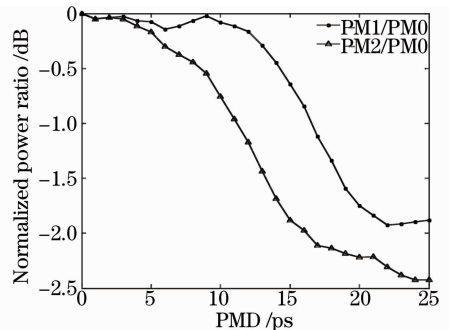


图5 二元相移键控调制时的偏振模色散监测曲线  
Fig. 5 PMD monitoring at BPSK modulation format

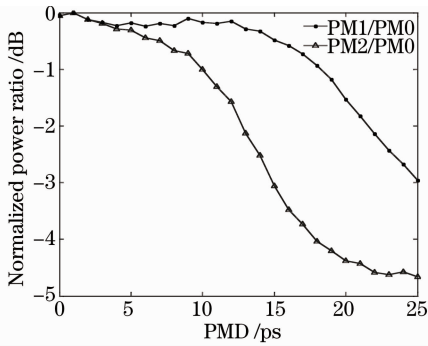
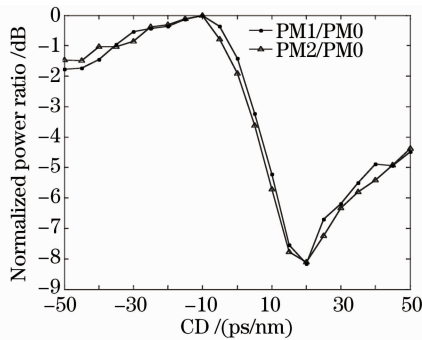


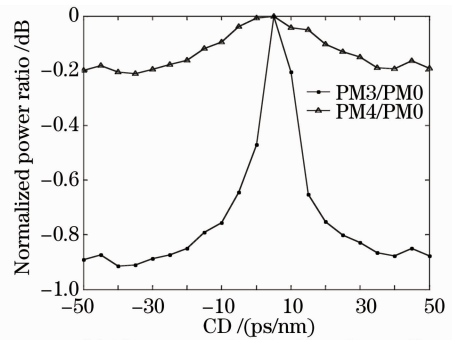
图 6 开关键控调制时的偏振模色散监测曲线

Fig. 6 PMD monitoring at OOK modulation format

制时的 PMD 监测结果曲线。在 BPSK 的调制格式下,在  $f_s+80$  GHz 处监测效果优于  $f_s-80$  GHz 处监测效果,监测范围可以达到 17 ps。在 OOK 的调制格式下,同样可以看出,在  $f_s+80$  GHz 处监测效果优于  $f_s-80$  GHz 处监测效果,监测范围可以达到 20 ps。



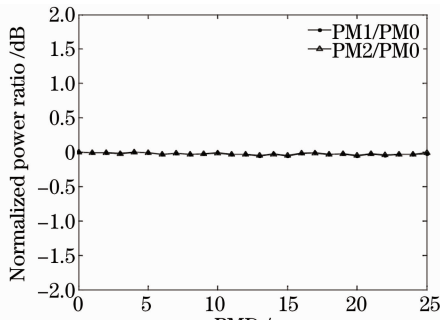
(a) The center of optical band pass filter is in  $f_s-80$  GHz or  $f_s+80$  GHz



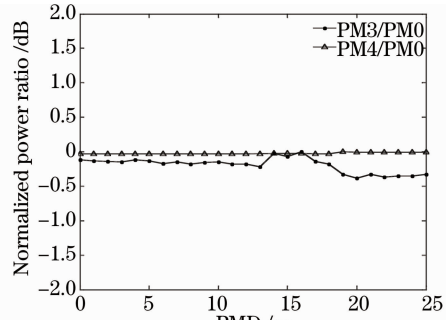
(b) The center of optical band pass filter is in  $f_p-40$  GHz or  $f_p+40$  GHz

图 7 抑制载波归零码调制时的色度色散监测曲线

Fig. 7 CD monitoring at CSRZ-OOK modulation format



(a) The center of optical band pass filter is in  $f_s-80$  GHz or  $f_s+80$  GHz



(b) The center of optical band pass filter is in  $f_p-40$  GHz or  $f_p+40$  GHz

图 8 抑制载波归零码调制时的偏振模色散监测曲线

Fig. 8 PMD monitoring at CSRZ-OOK modulation format

### 3.4 滤波器带宽的影响

本文提出的监测方案中很重要的一个方面就是滤波器的设计,滤波器的带宽都取用 15 GHz,但在实际应用中,很难保证精确度这么高的带宽窗口,往往会稍有扩大,因此有必要对带宽稍有增大后的监测结

### 3.3 对 PMD 不敏感的 CD 监测结果

对于抑制载波归零码(CSRZ-OOK)调制光信号,由于其载波被抑制的特性,能缓解偏振模色散的影响,相比非归零码和普通归零码有更高的偏振模色散容忍度<sup>[14]</sup>,利用此特性可以实现对 PMD 不敏感的 CD 监测,监测方案与上述相同。图 7 所示分别是通过 4 个滤波器得出的 CD 监测曲线。利用 SOA 的自相位调制效应,在  $f_s-80$  GHz 和  $f_s+80$  GHz 处监测的结果如图 7(a)所示,由于啁啾等的影响,使得曲线不以中心对称,监测范围约 20 ps/nm。利用 SOA 的交叉相位调制效应,在  $f_p-40$  GHz 和  $f_p+40$  GHz 处监测的结果如图 7(b)所示,监测范围约 20 ps/nm,但也存在精度比较低的缺陷。图 8 所示分别是通过 4 个滤波器得出的 PMD 监测结果曲线,随着 PMD 的变化,光功率比值基本不变,这就实现了对 PMD 不敏感的 CD 监测。

果与原实验结果进行比较。图 9(a)和(b)分别表示了滤波器中心频率在  $f_s+80$  GHz 处,带宽为 15 GHz, 20 GHz 时的 CD 和 PMD 监测结果曲线。随着 CD 或 PMD 的增大,两种滤波器的监测结果曲线差别有所增大,但这并不影响对 CD 或 PMD 的监测,CD 的监

测范围同样约为 30 ps/nm, PMD 的监测范围同样约为 17 ps。因此在实际应用中, 即便滤波器的设计有

所误差, 也不影响该技术对 CD 和 PMD 的监测。

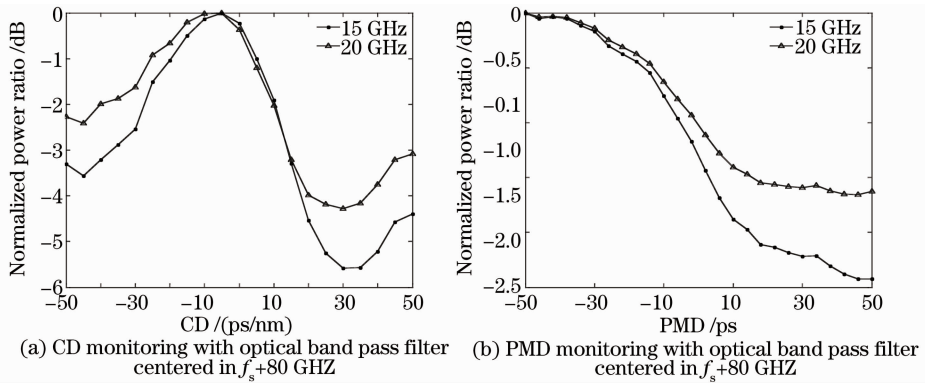


图9 不同滤波器带宽下的色散监测

Fig. 9 Dispersion monitoring in the different bandwidth of optical band pass filter

## 4 结 论

采用基于 SOA 的 SPM 和 XPM 效应引起的光谱变化来实现对光通信链路中的色散的监测, 包括对 CD 和 PMD 的监测。在 BPSK 调制格式下, CD 监测范围为  $\pm 30$  ps/nm, PMD 监测范围为 17 ps。在 OOK 调制格式下, CD 监测范围为  $\pm 40$  ps/nm, PMD 监测范围为 20 ps。同时考虑 SPM 和 XPM 的监测结果曲线, 还可以分辨出 CD 的正负符号。对信号进行抑制载波归零调制之后, 可以实现对 PMD 不敏感的 CD 监测, 监测范围约 20 ps/nm。在滤波器带宽稍有增加的情况下, 基本不影响采用该技术对系统色散的监测结果, 证明了利用 SOA 的 SPM 和 XPM 效应进行色散监测技术的实际可行性。该技术可以实现 40 Gb/s 的高速光纤通信系统的色散实时监测。

## 参 考 文 献

- 1 K. F. Tsai, W. I. Way. Chromatic-dispersion monitoring using an optical delay and add filter[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2005, **23**(11): 3737~3747
- 2 Yuan Guohui, Yu Jinlong, Hu Hao *et al.*. Adaptive feedback controlling of the first-order polarization mode dispersion compensation system for the 10 Gb/s optical fiber communication system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(1): 11~18  
袁国慧, 于晋龙, 胡浩等. 10 Gb/s 光纤通信系统一阶偏振模色散动态补偿系统反馈控制的实现[J]. *光学学报*, 2006, **26**(1): 11~18
- 3 J. Y. Yang, L. Zhang, X. Wu *et al.*. All-optical chromatic dispersion monitoring for phase-modulated signals utilizing cross-phase modulation in a highly nonlinear fiber[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2008, **20**(19): 1642~1644
- 4 Chen Ming, Zhang Yejin, Si Zhijian *et al.*. Research progresses of chromatic dispersion monitoring techniques in dynamic compensation systems[J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2006, **27**(5): 503~507  
陈明, 张冶金, 司治建等. 动态色散补偿系统中色散监测技术的研究进展[J]. *半导体光电*, 2006, **27**(5): 503~507

- 5 Y. K. Lize, L. Christen, J. Y. Yang *et al.*. Independent and simultaneous monitoring of chromatic and polarization-mode dispersion in OOK and DPSK transmission[J]. *IEEE. Photon. Technol. Lett.*, 2007, **19**: 3~5
- 6 Chen Ming, Zhang Yejin, He Lina *et al.*. Application of polarization SCM for simultaneous monitoring fiber CD and PMD [J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2007, **18**(6): 683~686  
陈明, 张冶金, 贺丽娜等. 偏振副载波调制在光纤色散与 PMD 监测技术中的应用[J]. *光电子 • 激光*, 2007, **18**(6): 683~686
- 7 P. S. Westbrook, B. J. Eggleton, G. Raybon *et al.*. Measurement of residual chromatic dispersion of a 40 Gb/s RZ signal via spectral broadening[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2002, **14**(3): 346~348
- 8 J. L. Blows, P. Hu, B. J. Eggleton. Differential group delay monitoring using an all-optical signal spectrum-analyser[J]. *Opt. Commun.*, 2006, **260**(1): 288~291
- 9 S. Li, D. V. Kuksenkov. A novel dispersion monitoring technique based on four-wave mixing in optical fiber [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2004, **16**(3): 942~944
- 10 Ying Shi, Minghua Chen, Shizhong Xie. A novel chromatic dispersion monitoring method in terms of SOA spectral shift[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2003, **1**(7): 383~384
- 11 Zhang Aixu, Yu Jinlong, Wang Yaotian *et al.*. Noninverted wavelength conversion for 40 Gb/s return-to-zero signal based on semiconductor optical amplifier and optical bandpass filter[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(2): 249~254  
张爱旭, 于晋龙, 王耀天等. 基于半导体光放大器和整形滤波器的 40 Gb/s 的归零正码波长变换研究[J]. *光学学报*, 2008, **28**(2): 249~254
- 12 Huang Dexiu, Wang Hui, Liu Deming. Static character analysis and experiment of gain-clamped SOA[J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(1): 17~21  
黄德修, 王惠, 刘德明. 增益钳制半导体光放大器的静态特性分析[J]. *中国激光*, 2003, **30**(1): 17~21
- 13 M. V. Drummond, L. N. Costa, R. N. Nogueira *et al.*. GVD and PMD monitoring by means of SPM and XPM effects in a SOA [C]. *ICTON*, 2008. 106~108
- 14 Xu Wei, Duan Gaoyan, Fang Guangqing *et al.*. Analysis of polarization mode dispersion compensation performance for different modulation formats [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(2): 226~232  
许玮, 段高燕, 方光青等. 不同调制格式的偏振模色散补偿性能分析[J]. *光学学报*, 2008, **28**(2): 226~232