

文章编号: 0258-7025(2005)07-0987-06

40 Gb/s 超快非线性干涉仪的实验分析

王卓然, 于晋龙, 王新兵, 杨恩泽

(天津大学电信学院光纤通信实验室 光电信息技术科学教育部重点实验室(天津大学), 天津 300072)

摘要 全光非线性开关是全光 3R 再生的关键技术。在对一种全光开关[超快非线性干涉仪(UNI)]的传输函数进行分析后,得到了超快非线性干涉仪窗口的数学描述。在此基础上通过实验得到了 40 Gb/s 的全光开关。并结合实验条件,具体分析了影响超快非线性干涉仪开关窗口的几个因素:增加半导体光放大器(SOA)的注入电流,增大控制脉冲的平均功率和调节连续光功率到最佳值,都能有效地改善输出窗口的形状和消光比,并对这种现象在理论上进行了初步分析。可以利用上述结论指导超快非线性干涉仪实验,从而使超快非线性干涉仪系统得到最大程度的优化。

关键词 光电子学; 全光开关; 超快非线性干涉仪; 半导体光放大器; 开关窗口

中图分类号 TH744.3 **文献标识码** A

Experimental Analysis of 40 Gb/s All Optical Switch Using Ultrafast Nonlinear Interferometer

WANG Zhuo-ran, YU Jin-long, WANG Xin-bing, YANG En-ze

(College of Electronics & Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China,
Key Laboratory of Opto-Electronics Information and Technical Science, Ministry of Education,
Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract The technology of 40 Gb/s has developed very slowly because of many factors, such as the nonlinear characteristic of optical fiber. All-optical regeneration is the effective way to solve this problem and the key of it is all-optical-nonlinear switch. After analyzing the transmission functions of a kind of all-optical switch (ultrafast nonlinear interferometer (UNI)), the mathematical descriptions of the UNI switch window are got. As a result, the data rate of the experiment according to UNI achieves 40 Gb/s. Combined with the experimental conditions, the influencing factors of UNI switch are analyzed. By increasing the injection current of semiconductor optical amplifier (SOA), the average power of control pulse and adjusting the power of continuous light to the optimal value, the shape and extinction ratio of UNI switch are effectively improved. Based on the experiment, this phenomenon is elementarily explained in theory. It is utilized these results to do the experiments in order to optimize the UNI system to the best conditions, which will be the theoretical and experimental foundations to all-optical regeneration and many other fields.

Key words optoelectronics; all optical switch; ultrafast nonlinear interferometer (UNI); semiconductor optical amplifier (SOA); switch window

1 引 言

40 Gb/s 作为一种未来光纤通信技术,具有目前低速系统不可比拟的多种优势^[1]。但在光网络和波分复用(WDM)长途传输干线中,光纤的自相位调制(SPM)、交叉相位调制(XPM)、四波混频

(FWM)与群速度色散(GVD)等不利因素,造成了脉冲序列到达时间抖动、光信号脉冲形状和频谱的畸变、消光比下降等现象,限制了整个系统和网络的传输速率和距离。40 Gb/s 技术受此限制,发展比较缓慢。全光 3R 再生(即信号的再放大、再定时、

收稿日期: 2004-11-01; 收到修改稿日期: 2004-12-13

基金项目: 国家 863 计划(2001AA312220)资助项目。

作者简介: 王卓然(1977—),男,山西省太原市人,天津大学电信学院博士研究生,主要从事光纤通信系统的研究。

E-mail: wzxwzr@163.com

再整形)技术由于对速率透明,不需要考虑不同信号的恶化原因,可保证网络的灵活性和扩展性等优点,成为克服这些不利因素的一个很好的途径。

全光 3R 再生的关键技术是全光非线性开关在高比特率和多波信号处理方面的发展。近年来通过对高速全光开关的研究分析,提出了一种称之为超快非线性干涉仪(UNI)的全光开关^[2,3],有着极佳的性能、很好的稳定性和应用前景。目前它对数据的再生能力达到了 40 Gb/s 以上^[4],对光时分复用(OTDM)数据的解复用能力也达到了 160 Gb/s^[2],利用它还可实现 320 Gb/s 的全光取样^[5]。本组自 2001 年以来深入研究全光开关的原理与特性^[6,7]。在国内已有的文献报道中,大多是对全光开关的数值模拟^[8],本文则通过超快非线性干涉仪的传输函数介绍了它的工作原理,并进行了 40 Gb/s 的超快非线性干涉仪实验,取得了不错的效果。

2 超快非线性干涉仪的传输函数及工作原理

超快非线性干涉仪的实验框图如图 1 所示,下面结合超快非线性干涉仪的原理来分析其传输函数^[9]。

设探测光脉冲(probe) E_{in} 经过起偏器(Polarizer1)后其偏振方向与第一段保偏光纤(PMF1)的主轴夹

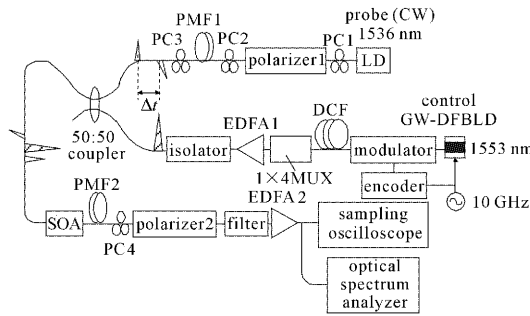


图 1 40 Gb/s 超快非线性干涉仪光开关的实验装置图
Fig. 1 Experimental setup of 40 Gb/s UNI optical switch

角为 45° ,探测光脉冲通过 PMF1 后分成两个互相垂直的偏振分量,并且它们之间产生一段延时 Δt ,形成相互正交的两个偏振光脉冲 E_y 和 E_x (假设 y 轴方向脉冲传输较快),这段延时通常称为差分群延时(DGD),决定了超快非线性干涉仪开关窗口的宽度,其表达式为^[10]

$$\Delta t = |n_o - n_e| \times L/c, \quad (1)$$

其中 n_e, n_o 为保偏光纤的快慢轴的折射率, L 为保偏光纤的长度, c 为探测光脉冲在保偏光纤中的群速度。这两个脉冲的幅值为

$$E_y = E_x = \sqrt{2}E_{in}/2, \quad (2)$$

控制光脉冲(control)经过一个 50:50 的耦合器插在两个偏振分量之间耦合进入半导体光放大器(SOA)。由于控制光脉冲会影响半导体光放大器的折射率和增益的非线性,利用了半导体光放大器的交叉相位调制效应,因此它会使后一个偏振光的相位变化,设 $G_y(t), G_x(t)$ 分别是半导体光放大器对前后脉冲的增益, $\varphi_y(t), \varphi_x(t)$ 分别是前后脉冲经过半导体光放大器后的相位,则经过半导体光放大器后前后脉冲的表达式为

$$E_{y(SOA)} = \sqrt{G_y(t)}E_y \exp[j\varphi_y(t)]j = \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{G_y(t)}E_{in} \exp[j\varphi_y(t)]j, \quad (3)$$

$$E_{x(SOA)} = \sqrt{G_x(t)}E_x \exp[j\varphi_x(t)]i = \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{G_x(t)}E_{in} \exp[j\varphi_x(t)]i, \quad (4)$$

PMF1 的快慢轴和起偏器(Polarizer1)的偏振方向如图 2(a)所示。

这两个光脉冲分量再经过第二段保偏光纤(PMF2)后合成一束线偏光。由于 PMF2 与 PMF1 特性、长度相同,快慢轴相反(即主轴正交),因此两个分离的探测光脉冲在经过 PMF2 后,在时间上重新重合,表达式如下

$$E_{out} = E_{y(SOA)} + E_{x(SOA)} = \frac{\sqrt{2}}{2}E_{in} \{ \sqrt{G_y(t)} \exp[j\varphi_y(t)]i + \sqrt{G_x(t)} \exp[j\varphi_x(t)]j \}, \quad (5)$$

之后重合的探测光脉冲输出检偏器(Polarizer2)时会形成干涉,此检偏器(k)与起偏器的偏振角度相垂直,PMF2 的快慢轴和检偏器的偏振方向如图 2(b)所示。输出的光脉冲等于其快慢轴上的分量在检偏器偏振方向上的投影,因此(5)式中的“+”变为“-”。输出的光信号强度为

$$P_{out} = |k \cdot E_{out}|^2 = \frac{1}{4} |E_{in}|^2 \{ \sqrt{G_y(t)} \exp[j\varphi_y(t)] - \sqrt{G_x(t)} \exp[j\varphi_x(t)] \} \times \{ \sqrt{G_y(t)} \exp[j\varphi_y(t)] - \sqrt{G_x(t)} \exp[j\varphi_x(t)] \}^* = \frac{1}{4} P_{in} \{ G_y(t) + G_x(t) - 2 \sqrt{G_y(t)G_x(t)} \cos[\varphi_y(t) - \varphi_x(t)] \}, \quad (6)$$

由(6)式,超快非线性干涉仪的传输函数可表示为

$$H(t) = \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{in}}} = \frac{1}{4} \{G_y(t) + G_x(t) - 2 \sqrt{G_y(t)G_x(t)} \cos[\varphi_y(t) - \varphi_x(t)]\}, \quad (7)$$

由(7)式可以看出,当 $\varphi_y(t) - \varphi_x(t) = \pi$, 即有控制光脉冲经过半导体光放大器后,使后一个探测光脉冲分量相位变化 π , 超快非线性干涉仪的输出脉冲的强度最大; $\varphi_y(t) - \varphi_x(t) = 0$, 即无控制光脉冲时,超快非线性干涉仪的输出最小,理想情况为零。这样就通过控制光脉冲的有无来实现窗口的开和关,从而实现了超快非线性干涉仪的开关功能。

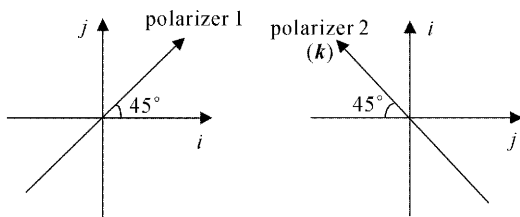


图2 PMF1 (a)和 PMF2(b)的快慢轴与检偏器的偏振方向
Fig. 2 Polarization directions of fast and slow axes of (a) PMF1 and polarizer 1 and (b) PMF2 and polarizer 2

两个分离的探测光脉冲分量的相位差 $\varphi(t)$ 和半导体光放大器的线宽增强因子 α 与两个脉冲分别经过半导体光放大器时的增益有关,其关系式如下

$$\varphi(t) = \varphi_y(t) - \varphi_x(t) = -\frac{\alpha}{2} \ln \left[\frac{G_y(t)}{G_x(t)} \right], \quad (8)$$

超快非线性干涉仪的传输函数 $H(t)$ 能够直观地反映超快非线性干涉仪的开关窗口,相位差 $\varphi(t)$ 表征了探测光脉冲的透过率。超快非线性干涉仪全光开关利用的是半导体光放大器的非线性,由(7), (8)式也可以看出半导体光放大器的交叉相位调制效应对超快非线性干涉仪开关窗口的影响。

3 实验和结果分析

实验框图如图1所示。10 GHz 微波源驱动激光器(DFBLD),经过伪随机码编码调制后由色散补偿光纤(DCF)压窄脉冲,通过一个 1×4 的复用器(MUX)后时分复用成 40 Gb/s 的控制脉冲信号,经过掺铒光纤放大器(EDFA)放大后进入超快非线性干涉仪系统,在输入端加一个光隔离器(isolator)以免超快非线性干涉仪系统对 40 Gb/s 光源产生影响。探测光用连续光来代替,这是为了观察 40 Gb/s 的超快非线性干涉仪开关窗口,以便对窗口的特性进行分析比较。超快非线性干涉仪系统中共用了 4

个偏振控制器(PC)以优化系统。PC1 的作用是分离输入数据在两个偏振方向的功率,使得数据光的偏振方向与起偏器的方向一致;PC2 调整两个偏振分量进入 PMF1 的功率分配;PC3 调整两段保偏光纤的快慢轴,使之正好相反;PC4 调整合成脉冲的偏振方向。在超快非线性干涉仪系统的输出端加了一个光学窄带滤波器(filter),它的作用不仅是滤除控制光脉冲,如果仔细调节还可以对输出开关窗口的红移拖尾部分产生较大的衰减,从而相当于减少了半导体光放大器的恢复时间,达到重整波形、提高窗口消光比和减少码型效应的目的^[11]。

实验条件如下:控制光脉冲的平均功率为 0.09 dBm,脉宽为 20 ps,波长为 1554 nm,速率为 40 Gb/s,图3为其眼图(a)和频谱图(b)。连续光的功率为 6.79 dBm,波长为 1536 nm;保偏光纤的差分群时延为 7.2 ps;半导体光放大器的注入电流为 240 mA。在以下分析中上述实验条件为默认条件。

在此实验条件下,得到了 40 Gb/s 的超快非线性干涉仪窗口眼图,它是一个反向窗口,窗口眼图和频谱图如图4所示。调节偏振控制器可以使超快非线性干涉仪输出窗口的消光比为最大,便于分析当实验条件改变时输出窗口的最大消光比的影响。在

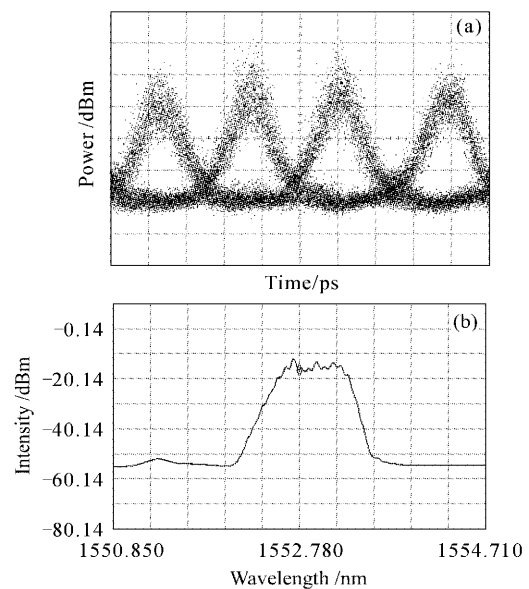


图3 40 Gb/s 控制光脉冲的眼图(a)和频谱图(b)
Fig. 3 Eye diagram (a) and spectrum (b) of 40 Gb/s control pulse

实验中,发现半导体光放大器的注入电流 I ,控制光脉冲的平均功率和连续光功率等因素对超快非线性

干涉仪窗口的形状和消光比都有很大的影响。以下是对上述影响因素的具体分析。

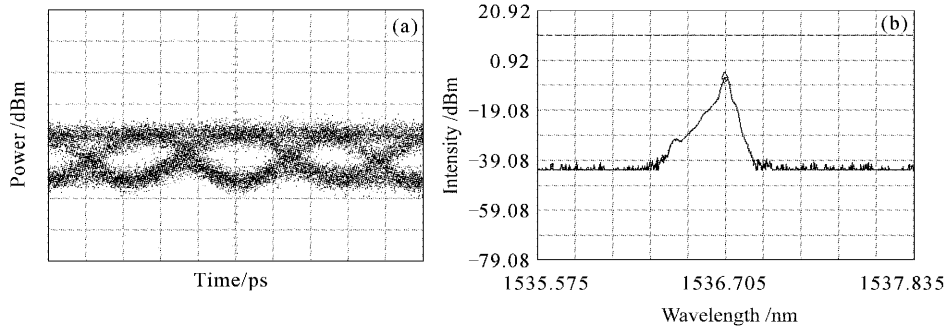


图 4 40 Gb/s 超快非线性干涉仪开关窗口的眼图(a)和频谱图(b)

Fig. 4 Eye diagram (a) and spectrum (b) of optical switch window of 40 Gb/s UNI

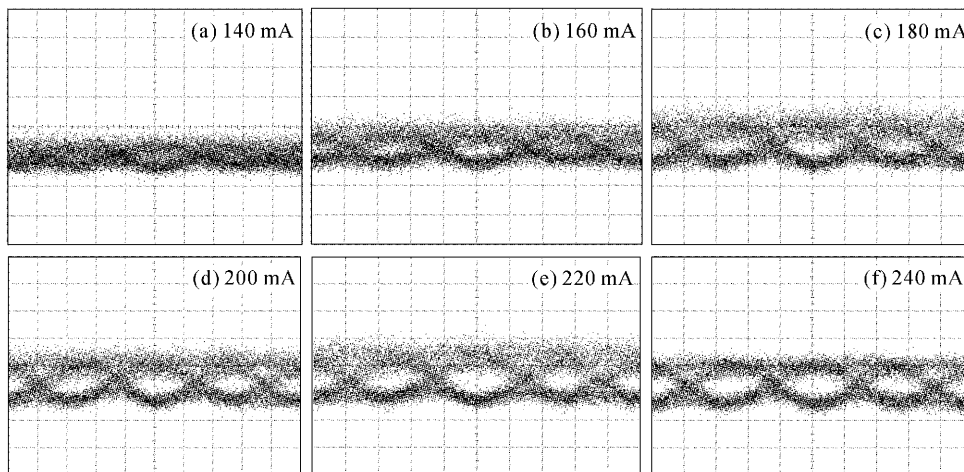


图 5 I 变化时超快非线性干涉仪开关窗口的眼图

Fig. 5 Variations of optical switch window of 40 Gb/s UNI with I

半导体光放大器是超快非线性干涉仪系统中最重要器件,它的许多内部参数对半导体光放大器的载流子恢复时间都有作用,因此对超快非线性干涉仪窗口都有着至关重要的影响,如线宽增强因子、载流子寿命、饱和能量等。虽然在实验中这些内部参数都不可变,由于半导体光放大器的注入电流 I 可以改变半导体光放大器的载流子浓度及恢复特性^[6],因此可通过改变 I 来观察半导体光放大器对窗口的影响。在其他实验条件不变的情况下,图 5 为当半导体光放大器的电流为 140 mA,160 mA,180 mA,200 mA,220 mA,240 mA 时的窗口眼图。当 I 加大时,载流子密度会相应地变大,半导体光放大器的增益也就随之增大。半导体光放大器的饱和增益和非饱和增益都会变大,从而半导体光放大器对前后脉冲的增益和相移的影响都有所变化,超快非线性干涉仪的输出窗口消光比也随之增加。

控制光脉冲会对半导体光放大器的载流子折射率产生影响^[12],从而使半导体光放大器产生交叉相位调制效应,这是产生开关窗口的必要条件。在其他实验条件不变的情况下,图 6 为当控制光脉冲的峰值脉冲功率为 -4 dBm, -3 dBm, -2 dBm, -1 dBm, 0 dBm 和 1 dBm 时的窗口眼图。因为半导体光放大器的增益特性为快响应、慢恢复,这就要求控制光脉冲应该是短脉宽、强功率。如果半导体光放大器的饱和过程不是在极短时间内完成的话,将使半导体光放大器的增益响应曲线的前沿有较大的倾斜,随之会引起超快非线性干涉仪开关窗口的前后沿倾斜,导致窗口的形状变差。如图 6 所示,当控制光脉冲的平均功率增加时,输出窗口的消光比也相应增大,与此同时,窗口宽度并未明显改变,所以控制光脉冲的平均功率主要影响开关窗口的消光比。

由于半导体光放大器的交叉相位调制效应也有连续光的作用,因此连续光功率必然对超快非线性干涉仪的开关窗口有影响。在其他实验条件不变的情况下,图 7 为当连续光功率分别为 1 dBm, 3

dBm, 5 dBm, 7 dBm, 9 dBm, 10 dBm 时的窗口眼图。由图可见,当连续光功率逐渐变大时,窗口的消光比并不是一直增大的,而是在某一个功率点(7 dBm)达到最大,然后消光比逐渐变差。

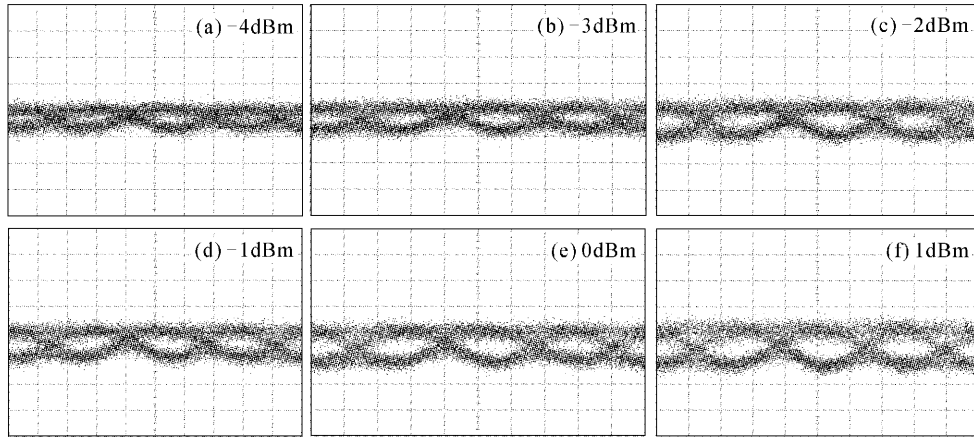


图 6 控制光脉冲功率变化时超快非线性干涉仪开关窗口的眼图

Fig. 6 Variations of optical switch window of 40 Gb/s UNI with adjusting the power of control pulse

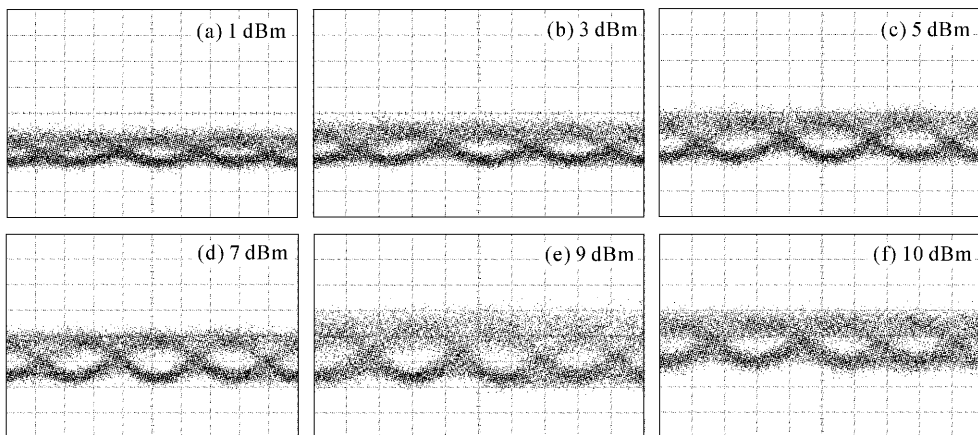


图 7 连续光功率变化时超快非线性干涉仪开关窗口的眼图

Fig. 7 Variations of optical switch window of 40 Gb/s UNI with adjusting the power of continual light

由实验结果可以看出,改变实验条件,如半导体光放大器的注入电流、控制光脉冲的平均功率和连续光功率,都可以对超快非线性干涉仪的开关窗口产生极大的影响。利用上述结果调整超快非线性干涉仪实验条件至最佳状态,可以最大限度地优化系统。这为在全光 3R 再生系统以及其他系统中应用超快非线性干涉仪全光开关打下了理论及实验基础。

参 考 文 献

- 1 Ning Tigang, Jian Wei, Pei Li *et al.*. Study on dispersion compensation of 40 Gb/s optical time division multiplexing transmission over G. 652 fiber [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(8): 1091~1094
- 2 宁提纲, 简伟, 裴丽等. 40 Gb/s 光时分复用传输光纤光栅补偿色散研究 [J]. *光学学报*, 2004, **24**(8): 1091~1094
- 3 C. Schubert, J. Berger, U. Feiste *et al.*. 160-Gb/s polarization insensitive all-optical demultiplexing using a gain-transparent ultrafast nonlinear interferometer [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2001, **13**(11): 1200~1202.
- 4 Chen Xingzhong, Yao Minyu, Gao Yizhi. Ultrafast nonlinear interferometer and its application on high-speed all-optical signal processing [J]. *J. Optoelectronics · Lasers*, 1999, **10**(5): 388~390
- 5 陈兴忠, 姚敏玉, 高以智. 超快非线性干涉仪及其在高速全光信号处理中的应用 [J]. *光电子·激光*, 1999, **10**(5): 388~390
- 6 A. E. Kelly, I. D. Phillips, R. J. Manning *et al.*. 80 Gbit/s all-optical regenerative wavelength conversion using semiconductor optical amplifier based interferometer [J]. *Electron. Lett.*, 1999, **35**(17): 1477~1478
- 7 Inuk Kang, K. F. Dreyer. Sensitive 320 Gbit/s eye diagram

- measurements via optical sampling with semiconductor optical amplifier-ultrafast nonlinear interferometer [J]. *Eelectron. Lett.*, 2003, **39**(14): 1081~1083
- 6 Wang Zhuoran, Yu Jinlong, Han Jinting *et al.*. Influences of injection current and the position offset of SOA on the switching window of TOAD [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **31**(2): 205~209
王卓然, 于晋龙, 韩金婷 等. SOA 注入电流及偏移量对 TOAD 开关窗口的影响 [J]. *中国激光*, 2004, **31**(2): 205~209
- 7 Wang Zhuoran, Yu Jinlong, Han Jinting *et al.*. 10 Gb/s optical switch using a scheme of ultrafast nonlinear interferometer (UND) [C]. APOC 2003, Wu Han. China, **5281**(04): 27~31
- 8 Xuetian Huang, Min Zhang, Lin Wang *et al.*. Novel scheme of 40 Gb/s all-optical NOT gate based on SOA-assisted Sagnac interferometer [C]. Communications, Circuits and Systems, ICCAS 2004. 2004 International Conference on , Volume: 1: 27~29
- 9 Chen Xingzhong, Yao Minyu, Gao Yizhi. Ultrafast nonlinear interferometer (UND) [J]. *Chinese J. Lasers*, 1999, **B8**(3): 203~206
- 10 J. P. Sokoloff, B. P. McGinnis, S. G. Lee *et al.*. Efficiently packaged ultrafast demultiplexers for high bandwidth optical TDM systems [J]. *Electron. Lett.*, 1997, **33**(19): 1648~1650
- 11 D. Mahgerefteh, P. Cho, J. Goldhar *et al.*. Technique for suppression of pattern dependence in a semiconductor-optical-amplifier wavelength converter [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1997, **9**(12): 1583~1585
- 12 Pang Huangang, Zhang Zhiyuan, Wu Shibao *et al.*. Influence of control pulse shape on switching characteristics of TOAD [J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(7): 886~890
逢焕刚, 张志远, 伍仕宝 等. 控制脉冲形状对太赫兹光非对称解复用器开关特性的影响 [J]. *光学学报*, 2001, **21**(7): 886~890