

文章编号: 0253-2239(2005)03-302-5

输入光特性对超快非线性干涉仪开关窗口的影响*

王卓然^{1,2} 于晋龙^{1,2} 袁国慧^{1,2} 王新兵^{1,2} 杨恩泽^{1,2}

(¹ 天津大学电信学院光纤通信实验室, 天津 300072
² 天津大学光电信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300072)

摘要: 就超快非线性干涉仪(UNI)的输入光特性对其开关窗口的影响进行了数值模拟和实验研究,输入光包括控制光脉冲和探测光脉冲。在数值模拟中,调节控制光脉冲和探测光脉冲的功率及脉宽,功率越高和脉宽越窄,窗口的形状越好。在调节过程中发现控制光脉冲和探测光脉冲都存在一个最佳的功率点使窗口的形状达到最优。如果继续增大控制光脉冲功率,会使窗口的顶部倾斜,窗口形状恶化;而继续增大探测光脉冲功率,窗口的消光比开始下降。在数值模拟的基础上进行了 10 Gb/s 的超快非线性干涉仪全光开关实验,在实验中用连续光代替探测光脉冲以观察窗口形状。通过改变控制光脉冲和连续光功率来验证它们对超快非线性干涉仪开关窗口的影响。实验表明,应选用短而强的控制光脉冲和最优功率点的连续光,这与模拟结果吻合。

关键词: 光纤通信技术;超快非线性干涉仪;半导体光放大器;交叉相位调制;开关窗口

中图分类号: TN25 文献标识码: A

Influences of Input Optical Pulses on Switching Window of UNI

Wang Zhuoran^{1,2} Yu Jinlong^{1,2} Yuan Guohui^{1,2} Wang Xinbing^{1,2} Yang Enze^{1,2}

(¹ College of Electronics & Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072
² Key Laboratory of Optoelectronics Information and Technical Science, Ministry of Education,
Tianjin University, Tianjin 300072)

Abstract: Influences of input optical pulses including the control pulse and probe pulse on the switching window of ultrafast nonlinear interferometer (UNI) are studied by numerical simulation and experiment. The power and width of input optical pulses are adjusted in the process of numerical simulation. In the beginning, the higher the powers of control pulse and probe pulse and the narrower the widths of them, the better the shape of the switching window. There are optimal values of the power of them for the best shape of the switching window. If the power of control pulse continues to increase, the top of the switching window inclines and the shape of the switching window gets worse. Similarly, if the power of probe pulse continues to increase, the extinction ratio of switching window would decrease. In the experiment of 10 Gb/s UNI, the continuous light is used to replace the probe pulse in order to observe the switching window. By changing the powers of control pulse and the continuous light, the results of simulation are verified. The experiment demonstrates that the high power and the narrow width of control pulse and the optimal power of continuous light should be selected. The result of experiment is quite similar to the simulation.

Key words: optical fiber communication technology; ultrafast nonlinear interferometer; semiconductor optical amplifier; cross phase modulation; switching window

1 引 言

全光开关作为一种新兴的技术在光通信领域,尤其是光时分复用(OTDM)系统和全光 3R 再生系

统中有着广泛的应用。全光开关的最重要的性能参量之一是开关速度,如何提高开关速度是研究全光开关需要解决的问题。近年来提出了一种称之为超

* 国家 863 计划(2001AA312220)资助课题。

作者简介:王卓然(1977~),男,山西太原人,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工作。
E-mail: wzxwzr@163.com。

收稿日期:2004-04-01;收到修改稿日期:2004-09-02

快非线性干涉仪(UNI)的全光开关^[1,2],它有着较好的稳定性和应用前景。超快非线性干涉仪的开关速度非常高,目前对数据的再生能力已经达到了40 Gb/s以上^[3],对光时分复用数据的解复用能力也达到了160 Gb/s^[1],利用超快非线性干涉仪还可实现320 Gb/s的全光取样^[4]。近年来国内也对此展开了多方面的研究,包括超快非线性干涉仪的原理及特性^[5]和在光时分复用系统当中的解复用器实验^[6]等。本课题组在研究太赫兹光学非对称解复用器(TOAD)等多种全光开关的基础上^[7],对超快非线性干涉仪的开关特性进行了深入的分析^[8]。本文主要讨论了超快非线性干涉仪的工作原理及输入光(包括控制光脉冲和探测光脉冲)特性对开关窗口的影响,并进行了相关的数值模拟和实验研究。

2 原理^[5,8]

超快非线性干涉仪的实验框图如图1所示。

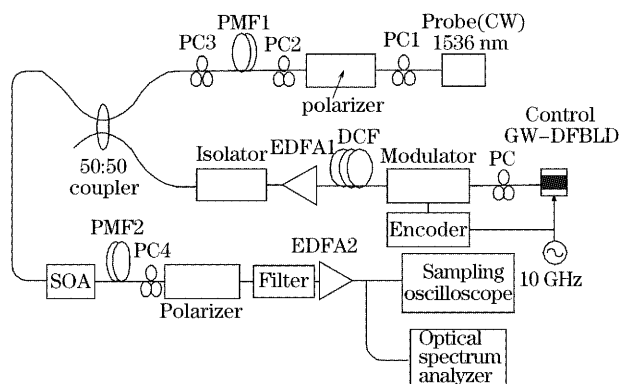


图1 超快非线性干涉仪光开关的实验装置图

Fig. 1 Experimental setup of UNI optical switch

超快非线性干涉仪的工作过程如下:探测光脉冲(Probe)进入起偏器(Polarizer)后以与保偏光纤(PMF)的快慢轴分别成45°的偏振方向进入PMF1。脉冲的快慢轴分量通过PMF1后会产生一个延时,这段延时即差分群延时(DGD)。超快非线性干涉仪的开关窗口宽度主要由差分群延时的大小决定。控制脉冲(Control)经过一个50:50的耦合器插在分开的两个偏振分量光脉冲之间耦合进入半导体光放大器(SOA)。控制脉冲在进入超快非线性干涉仪前先经过色散补偿光纤(DCF)以压窄脉冲。由于控制脉冲输入会影响半导体光放大器的折射率和慢恢复特性,会使后一个偏振光的相位发生改变(即交叉相位调制XPM)。分离的两个偏振光脉冲再经过一段PMF2(与前面PMF1的特性、长度都相同,但快慢轴相反)后合成一束线偏光,当两个

偏振分量的相位差为 π 时,其合成的偏振方向与输入的探测光脉冲的偏振方向成90°,与检偏器的方向相同,有数据输出;如果没有控制脉冲时,当两个偏振分量的相位差为0,合成后的光的偏振态与检偏器的方向正好差90°,无数据输出,这样就可以通过有无控制脉冲来实现超快非线性干涉仪的开关。在数据输出端的滤波器用于滤除控制脉冲;实验中共用了4个偏振控制器(PC),对各部分的光偏振态进行调节,以保证系统工作在最佳状态,使主窗口的消光比达到最大。同时也可以压制伴随窗口。

超快非线性干涉仪开关窗口的形成主要是由于半导体光放大器的交叉相位调制引起的,一般来说,交叉相位调制是由输入光功率对半导体光放大器非线性折射率的调制引起的。当两个或多个中心频率不同的光波在非线性介质中同时传输时,每一频率光波的幅度调制都将引起光纤折射率的相应变化,并对其它频率光波产生非线性相位调制,所以改变控制脉冲和探测光脉冲特性都对开关窗口有着直接的影响。

3 数值模拟

半导体光放大器的载流子密度速率方程、对光脉冲的增益分别由下面两式来描述^[9,10]:

$$\frac{\partial N}{\partial t} = \frac{I}{qV} - \frac{N}{\tau_c} - \frac{G(z,t)}{h\nu_0 S} |A(z,t)|^2, \quad (1)$$

$$G(z,t) = \Gamma A_g (N - N_0), \quad (2)$$

其中 I 为注入电流, q 为电子电荷, V 为有源区的体积, N 为载流子浓度, τ_c 为载流子自发寿命, $h\nu_0$ 为光子能量, S 为有源区横截面面积。 $A(z,T) = \sqrt{P(z,T)} \exp[i\phi(z,T)]$ 为光脉冲的慢变包络, $P(z,T)$ 代表功率, $\phi(z,T)$ 代表相位。 $G(z,t)$ 为光脉冲经过半导体光放大器有源区 Z 距离后的增益, Γ 为模式限制因子, A_g 为增益系数, N_0 为透明载流子密度。

将(2)式代入(1)式中可得

$$\frac{\partial G(z,t)}{\partial t} = \frac{g_0 - G(z,t)}{\tau_c} - \frac{G(z,t)}{E_{\text{sat}}} |A(z,t)|^2, \quad (3)$$

由(3)式可得 $G(t)$ 的数值解。式中 g_0 为小信号增益^[11],表达式由(4)式给出:

$$g_0 = \Gamma A_g N_0 (I/I_0 - 1), \quad (4)$$

其中 $I_0 = qVN_0/\tau_c$ 为透明电流; E_{sat} 为饱和能量,表达式为

$$E_{\text{sat}} = h\nu_0 S / (\Gamma A_g) = h\nu_0 \sigma / A_g.$$

光脉冲经过半导体光放大器后的功率和相位分

别为^[8]

$$P_{out}(t) = P_{in}(t)G(t), \quad (5)$$

$$\phi_{out}(t) = \phi_{in}(t) - ch(t)/2, \quad (6)$$

其中 $h(t) = \int_0^L G(z,t)dz$ 为放大函数, 也称作积分增益, 它的物理意义是光脉冲从入射点 ($z = 0$) 到 L 点之间的积分增益^[12]。

半导体光放大器对输入光脉冲的增益和相位都有影响, 因此当输入脉冲的特性改变时会对超快非线性干涉仪开关窗口产生影响^[12,13]。下面针对控制光脉冲和探测光脉冲特性对开关窗口的影响进行分析。

数值模拟的默认参量如下: 保偏光纤快慢轴延时为 20 ps; 线宽增强因子 α 为 5; 载流子寿命 τ_c 为 250 ps; 饱和能量 E_{sat} 为 8 pJ; 控制光脉冲 P_{ctrl} 为高斯

脉冲, 周期 T 为 100 ps、宽度 t_0 为 10 ps、峰值功率 P 为 4 mW; 探测光脉冲 P_{data} 也是高斯脉冲, 周期 T 为 100 ps、宽度 t_0 为 10 ps、峰值功率 P 为 1 mW; 半导体光放大器小信号增益 g_0 和半导体光放大器有源区长度 L 的乘积 g_0L 为 200; 半导体光放大器的注入电流为 200 mA, 模式限制因子 Γ 为 0.2。

控制光脉冲进入超快非线性干涉仪系统后, 对半导体光放大器的载流子折射率产生影响, 从而影响半导体光放大器对探测光脉冲两个偏振分量脉冲的相位调制(即交叉相位调制效应), 这是产生开关窗口的必要条件。图 2 表示控制光脉冲峰值功率 P_{ctrl} 变化时的超快非线性干涉仪开关窗口和相位差的模拟图形, 图 3 表示控制光脉冲脉宽 t_0 变化时的超快非线性干涉仪开关窗口和相位差的模拟图形。

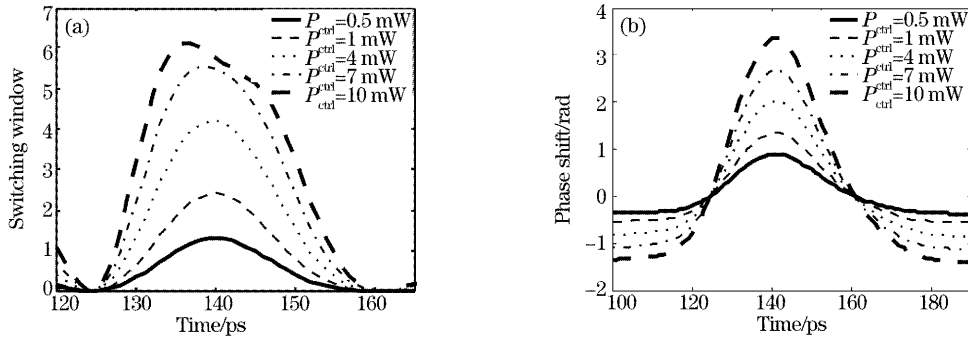


图 2 控制脉冲峰值功率变化时的超快非线性干涉仪开关窗口(a)和相位偏移(b)的模拟图

Fig. 2 Simulation of variations of switching window (a) and phase shift (b) of UNI with the peak power of the control pulse

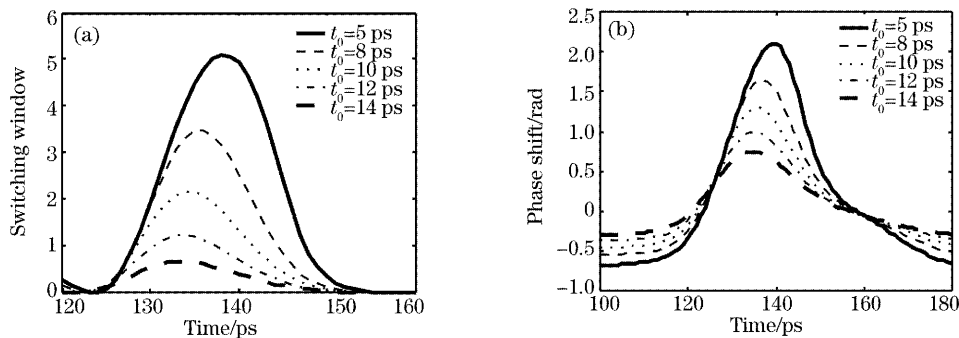


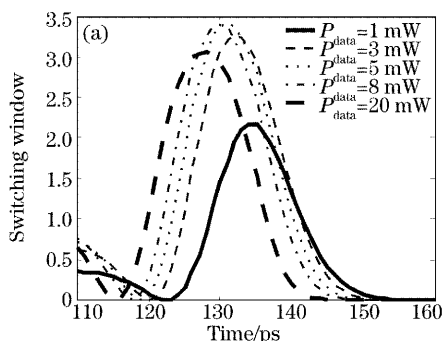
图 3 控制脉冲宽度变化时的超快非线性干涉仪开关窗口(a)和相位偏移(b)的模拟图

Fig. 3 Simulation of variations of switching window (a) and phase shift (b) of UNI with the width of the control pulse

由图中可以看出, 随着控制光脉冲峰值功率的增加, 输出窗口的消光比也相应的增大, 与此同时, 窗口的宽度并未改变, 所以控制光脉冲的峰值功率主要影响开关窗口的消光比。当 P 增大到 10 mW 时, 两个偏振分量经过半导体光放大器后的相位差超过了 π , 窗口的消光比虽然继续增大, 但出现了双峰现象, 左右两边也变得极不对称。因此, 控制光脉冲的峰值功率不能太大, 否则会影响开关窗口的特性。当脉冲宽

度逐渐变大时, 窗口的高度降低, 但宽度几乎没有变化, 相位差也同时变小了。综合上面两点可以看出, 要得到好的开关窗口, 需要短而强的控制光脉冲。因为半导体光放大器的增益特性为快响应、慢恢复, 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, 这将会引起超快非线性干涉仪开关窗口的前后沿倾斜, 窗口的形状随之变差。

由于半导体光放大器的交叉相位调制作用的存在,探测光脉冲的特性对窗口也必然产生影响。图 4



表示探测光脉冲峰值功率变化时的窗口和相位差,图 5 表示探测光脉冲脉宽变化时的窗口和相位差。

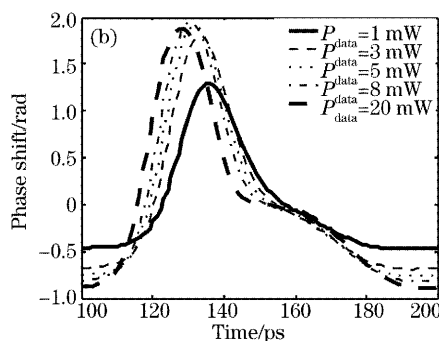
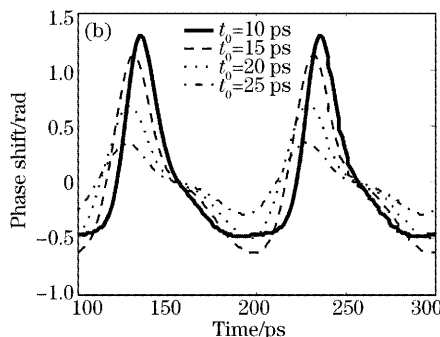
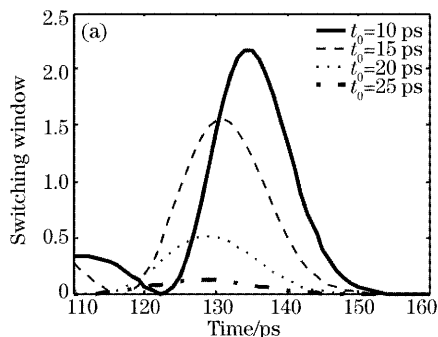


图 4 探测光脉冲峰值功率变化时的超快非线性干涉仪开关窗口(a)和相位偏移(b)的模拟图

Fig. 4 Simulation of variations of switching window (a) and phase shift (b) of UNI with the peak power of the probe pulse



5 探测光脉冲脉宽变化时的超快非线性干涉仪开关窗口(a)和相位偏移(b)的模拟图

Fig. 5 Simulation of variations of switching window (a) and phase shift (b) of UNI with the width of the probe pulse

由图可见,当探测光脉冲峰值功率逐渐变大时,窗口的消光比并不是线性增大的,而是在某一个功率点时达到最大,然后又逐渐变小。同时相位差峰值变化不大,没有出现超过 π 的情况,但在曲线的下方出现了抖动,说明载流子浓度变化剧烈,折射率很不稳定。因此在实验当中应当选择合适的探测光脉冲功率,以使开关窗口的消光比达到最大。当脉冲宽度增大时,载流子浓度恢复的更加缓慢,对应于窗口的消光比也一直下降,宽度却增大了,折射率也变得很小,同时变化非常剧烈。

4 实验结果及讨论

实验框图如图 1 所示。为了观察 10 Gb/s 超快非线性干涉仪的开关窗口,实验中用连续光来代替探测光脉冲,这时在输出端得到的就是开关窗口的形状,以便对窗口的特性进行分析比较。

以下是超快非线性干涉仪的实验条件:控制光脉冲的峰值功率为 7.2 dBm,脉宽为 20 ps,波长为 1553 nm,速率为 10 Gb/s,如图 6 所示;连续光的功率

为 10 dBm,波长为 1536 nm;保偏光纤的差分群时延为 20.4 ps;半导体光放大器的注入电流为 200 mA。

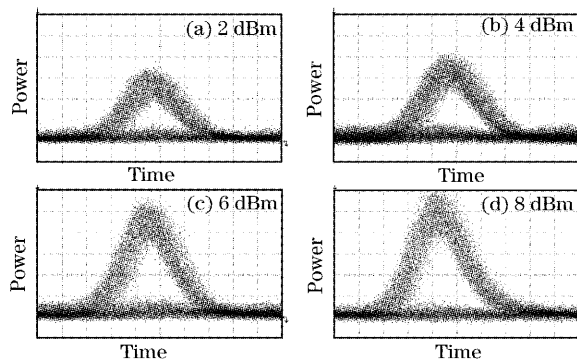


图 6 调节控制脉冲功率时窗口眼图的变化趋势

Fig. 6 Experiment of variations of switching window with adjusting the power of control pulse

在实验中,调节偏振控制器减小伴随窗口,使主窗口的输出消光比为最大,便于分析当峰值功率改变时输出窗口的最大消光比的影响。调节控制光脉冲峰值功率为 2 dBm、4 dBm、6 dBm、8 dBm 得到的窗口眼图如图 6 所示。调节连续光功率为 3 dBm、6 dBm、9 dBm、12 dBm 得到的窗口眼图如图 7 所示。

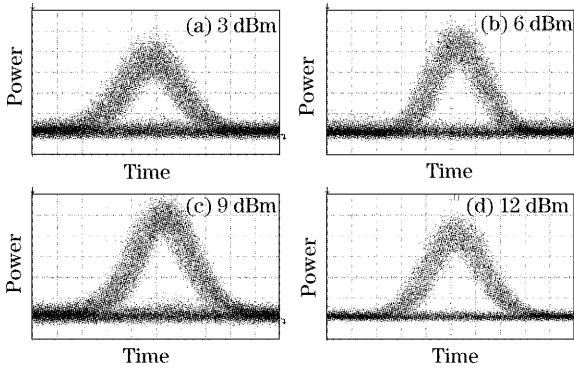


图 7 调节连续光功率时窗口眼图的变化趋势

Fig. 7 Experiment of variations of switching windows with adjusting the power of continual light

控制光脉冲峰值功率增加会使半导体光放大器中的交叉相位调制效应加大,即引起载流子折射率的改变增大,从而导致开关窗口的消光比增大,当控制光脉冲峰值功率为 6 dBm 时窗口形状消光比最佳。当增加到 8 dBm 时窗口形状变得不太对称。当连续光功率到 9 dBm 附近时窗口的消光比达到最大,然后又逐渐变小。实验结果和前面的理论分析基本相同。

5 结 论

本文首先结合半导体光放大器的载流子密度速率方程及其对光脉冲的增益分析了半导体光放大器对光脉冲的作用,对参量变化时窗口变化情况进行了模拟,分析了对窗口的影响,表明应当采用短而强的控制光脉冲和探测光脉冲,其功率增大到某一值时,开关窗口达到最佳效果。在实验中用连续光代替探测光脉冲以观察开关窗口,并通过改变控制光脉冲峰值功率和连续光功率观察 10 Gb/s 的超快非线性干涉仪全光开关窗口,以对模拟的结论进行验证,得到的结果吻合得很好。

参 考 文 献

1 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 Photonics Technol. Lett.*, 2001, **13**(11): 1200~1202

2 Chen Xingzhong, Yao Minyu, Gao Yizhi. Ultrafast nonlinear interferometer and its application on high-speed all-optical signal processing[J]. *J. Optoelectronics Laser*, 1999, **10**(5): 388~390 (in Chinese)
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

3 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

4 Inuk Kang, K. F. Dreyer. Sensitive 320 Gbit/s eye diagram measurements via optical sampling with semiconductor optical amplifier-ultrafast nonlinear interferometer[J]. *Electron. Lett.*, 2003, **39**(14): 1081~1083

5 Chen Xingzhong, Yao Minyu, Gao Yizhi. Ultrafast nonlinear interferometer (UND)[J]. *Chin. J. Laser*, 1999, **B8**(3): 203~206

6 Chen Xingzhong, Yao Minyu, Zhang Jianfeng. Experimental demonstration of all-optical time division demultiplexing in an ultrafast nonlinear interferometer [J]. *Chin. J. Electron.*, 2000, **9**(2): 132~134

7 Wang Zhuoran, Yu Jinlong, Han Jinting *et al.*. Influences of injection current and position offset of SOA on the switching window of TOAD[J]. *Chin. J. Laser*, 2003, **31**(2): 205~209 (in Chinese)
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

8 Wang Zhuoran, Yu Jinlong, Han Jinting *et al.*. 10 Gb/s optical switch using a scheme of ultrafast nonlinear interferometer (UND) [C]. *APOC 2003*, Wuhan, China, **5281**(04): 27~31

9 Xie Chongjin, Ye Peida. Influences of fast gain saturation and length of SOA on the performances of TOAD [J]. *Chin. J. Lasers*, 2000, **A27**(6): 525~530 (in Chinese)
谢崇进,叶培大. 半导体光放大器的快速饱和效应及其长度对 TOAD 解复用器性能的影响[J]. *中国激光*, 2000, **A27**(6): 525~530

10 Tang J. M, Shore K. A.. Strong picosecond optical pulse propagation in semiconductor optical amplifiers at Transparency [J]. *IEEE. Quant. Electron.*, 1998, **34**(7): 1263~1269

11 Pang Huangang, He Jinlin, Zhang Zhiyuan *et al.*. Influences of the small signal gain and loop's time asymmetry on the switching characteristics of TOAD[J]. *J. Southeast University*, 2000, **30**(3): 36~40 (in Chinese)
逢焕刚,何瑾琳,张志远等. 小信号增益及环时间非对称性对 TOAD 开关特性的影响[J]. *东南大学学报*, 2000, **30**(3): 36~40

12 Pang Huangang, Zhang Zhiyuan, Yan Senlin *et al.*. Study on the switching characteristics of TOAD[J]. *Chin. J. Lasers*, 2001, **A28**(7): 641~644 (in Chinese)
逢焕刚,张志远,颜森林等. TOAD 的开关特性研究[J]. *中国激光*, 2001, **A28**(7): 641~644

13 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 (in Chinese)
逢焕刚,张志远,伍仕宝等. 控制光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