

文章编号: 0258-7025(2004)02-0205-05

# SOA 注入电流及位置偏移量对 TOAD 开关窗口的影响

王卓然, 于晋龙, 韩金婷, 杨恩泽

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

**摘要** 对影响太赫兹光学非对称解复用器(TOAD)开关窗口的半导体光放大器(SOA)的注入电流和在环路中的偏移量这两个因素进行了数值模拟及实验研究,加大注入电流可以增加SOA的增益,使得开关窗口的高度增加,SOA在环路中的偏移量决定了开关窗口的宽度。由于实验中用连续光代替信号脉冲以观察开关窗口,可以看到随着偏移量的增大,开关窗口的主窗口的宽度先增大,当窗口宽度为控制脉冲周期的一半后,开关窗口的主窗口的宽度又变小。

**关键词** 光电子学;太赫兹光学非对称解复用器;半导体光放大器;开关窗口;交叉相位调制

中图分类号 TN 929.11 文献标识码 A

## Influences of Injection Current and the Position Offset of SOA on Switching Window of TOAD

WANG Zhuo-ran, YU Jin-long, HAN Jin-ting, YANG En-ze

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

**Abstract** In this paper, the influences of the injection current and the position offset of SOA on the switching window of TOAD are studied by proceeding simulation and experiment. The increase of the injection current can increase the gain of SOA and the height of switching window. The width of switching window is determined by the position offset of SOA. In the experiment, continuous light was used to replace the signal pulses. With the increase of the position offset of SOA, at first the width of the main switching window increases, then decreases when it equals to half of the control pulse period.

**Key words** optoelectronics; terahertz optical asymmetric demultiplexer (TOAD); semiconductor optical amplifier (SOA); switching window; cross phase modulation (XPM)

## 1 引言

基于半导体光放大器(SOA)的太赫兹光学非对称解复用器(TOAD)是用于光时分复用(OTDM)系统和全光信号处理中的一种超高速全光开关器件,它除了可用作OTDM中的解复用器,还可以作为全光光开关用作全光3R再生中的光判决门。TOAD是非线性光纤环境(NOLM)和半导体光放大器相结合的产物,充分发挥了二者的优势,避免了它们的不足。其开关窗口主要受SOA的注入电流、非对称偏

移量以及控制脉冲功率等因素的影响<sup>[1]</sup>。近年来,TOAD作为一种新的全光高速光信号处理器件已受到国内外的广泛重视。目前,北京邮电大学、清华大学、东南大学对此都有相关报道,对SOA影响开关窗口的因素进行了讨论<sup>[2]</sup>,如小信号增益<sup>[3]</sup>和非对称偏移量<sup>[3,4]</sup>,但基本是基于理论模型和数值模拟,没有相关的实验报道。本文主要讨论SOA的注入电流及非对称偏移量对TOAD开关窗口的影响,进行了相关的实验研究,并将实验结果与数值模拟的结果进行了对比。

收稿日期 2003-04-11;收到修改稿日期 2003-06-02

基金项目 国家高技术863项目(编号2001AA312220)资助课题。

作者简介 王卓然(1977—),男,天津大学电信学院研究生,主要从事光纤通信系统的研究。E-mail: wzwzwr@163.com

### 2 TOAD 的基本工作原理

在普通的光纤环境内非对称地放置一个非线性元件(NLE)即构成 TOAD ,其中 NLE 常采用半导体光放大器。TOAD 是一种用控制脉冲来控制信号脉冲是否通过的光开关。其基本的工作原理可简述如下：

控制脉冲从波分复用(WDM)器输入 TOAD ,信号脉冲通过耦合器(耦合比  $K = 0.5$ )进入环路后分为顺时针(CW)和逆时针(CCW)方向传播的两路相向信号。由于 SOA 偏离环的中点距离  $\Delta x$ (SOA 的偏移量),两路信号在不同时刻经过 SOA ,时间差为

$$\Delta t = 2\Delta x/v_g \tag{1}$$

$v_g$  为信号脉冲在光纤中的群速度。当无控制脉冲时 相当于 0 码 ,SOA 对两路时钟脉冲作用相同 ,顺时针信号和逆时针信号在耦合器处干涉 ,其结果是信号完全反射 ,TOAD 相当于一个反射镜 ,无信号输出 ,TOAD 关。当有控制脉冲输入时 ,功率较大的控制脉冲使得 SOA 的载流子密度发生动态改变 ,而顺时针信号和逆时针信号在不同的时刻经过 SOA ,它们受到控制脉冲的交叉增益调制(XGM)<sup>[5]</sup>和交叉相位调制(XPM)<sup>[6]</sup>的情况将有所不同 ,其干涉结果使得 TOAD 开。

TOAD 开关窗口形成主要是交叉相位调制作用的结果<sup>[5]</sup> ,但交叉增益调制也不可忽略<sup>[6]</sup> ,最佳窗口的条件要同时考虑两者。顺时针光到达 SOA 而逆时针光未到达时 ,时间差为  $\Delta t$  ,TOAD 产生的窗口由于其高度较高 ,所以称之为主窗口。当逆时针光到达时 ,由于增益的慢恢复 ,逆时针光的相位变化被顺时针光的相位变化所补偿 ,此时两束光的相位差很小 ,由此产生的窗口称为伴随窗口 ,在  $\Delta t$  比较小的情况下 ,其高度很小 ,可以忽略。以下未加说明时 ,开关窗口指的都是主窗口。

### 3 数值模拟

载流子密度速率方程<sup>[7]</sup>为

$$\frac{\partial N}{\partial t} = \frac{N(t)}{qV} - \frac{\Gamma\alpha(N - N_{th})P}{wd \cdot h\nu} - \frac{N(t)}{\tau_c} \tag{2}$$

$N$  为载流子密度  $I$  为注入电流  $q$  为电子电荷 , $V$  为有源区体积 , $\Gamma$  为模式限制因子  $\alpha$  为微分增益系数  $N_{th}$  为阈值载流子密度  $w$  为有源区宽度  $d$  为有源区高度  $h\nu$  为光子能量  $P$  为信号功率  $\tau_c$  为载流子寿命。 $\frac{N(t)}{qV}$  表示注入电流改变而引起有源区内载

流子浓度的改变  $\frac{\Gamma\alpha(N - N_{th})}{wd \cdot h\nu}P$  表示受激辐射复合

而引起的载流子浓度变化  $\frac{N(t)}{\tau_c}$  表示自发辐射复合和非辐射复合引起的载流子浓度降低。由公式(2)可知 ,注入电流  $I$  与载流子恢复速度成正比。由于 SOA 的交叉增益调制和交叉相位调制效应都和载流子密度有关 ,因此 SOA 的注入电流可以对开关窗口产生影响。

以下为对注入电流影响的数值模拟。假设输入的控制脉冲是高斯脉冲 ,其宽度为 80 ps ,连续光功率为 -5 dBm ,非对称偏移量为 120 ps。由于控制脉冲的宽度远大于 10 ps ,可以忽略 SOA 的非线性增益效应。

图 1 反映了不同 SOA 的注入电流与 TOAD 开关窗口的关系。当控制脉冲功率和脉宽等因素都不变的情况下 ,SOA 的注入电流加大时 ,载流子密度会相应地变大 ,SOA 的增益也就随之增大。SOA 的饱和增益和非饱和增益都会变大 ,从而 SOA 对顺时针光和逆时针光的增益和相移的影响都会有所变化 ,TOAD 的输出窗口幅度也会增加。如果电流太大使相位差超过  $\pi$  ,尽管开关窗口的高度依然增加 ,但会影响窗口的形状 ,会出现幅度的双峰现象。因此注入电流不能过大 ,以不出现双峰、相位差为  $\pi$  时的电流为佳。

SOA 的非对称偏移量决定了 TOAD 开关窗口

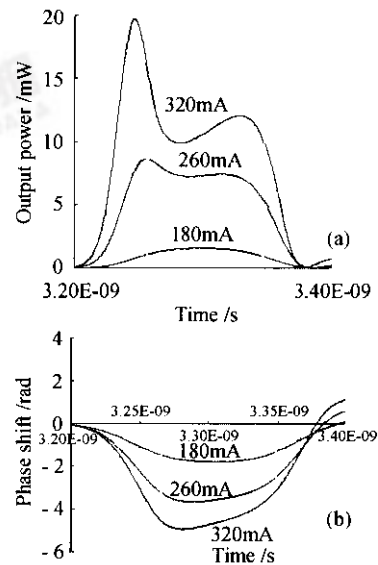


图 1 不同 SOA 注入电流时 TOAD 开关窗口和相位差的模拟图

Fig. 1 Simulation of variations of switching window and phase shift of TOAD with injection current of SOA

的宽度,如图 2 所示。图 2(a)为(b)的主窗口。非对称偏移量从左到右依次为 1 2 3 4 5 cm。其中控制脉冲峰值功率为 3 mW,周期为 500 ps,脉宽为 80 ps,用连续光代替信号脉冲以观察输出的开关窗口,连续光功率为 -5 dBm,电流为 150 mA。当偏移量决定的窗口宽度为控制脉冲周期的一半时,主窗口与伴随窗口一致。此后随着偏移量增加,原来的主窗口高度减小,成为伴随窗口,而原来的伴随窗口变得更加明显,变成主窗口。窗口的宽度对应的

SOA 非对称偏移量的值较小,比如要实现 50 ps 的开关窗口,根据公式(1),SOA 偏离中点的距离约为 1 cm。但是 SOA 并不一定要在 TOAD 的中点附近,因为时钟脉冲具有周期性,由公式(1)可知, $2\Delta x$  与  $2\Delta x + n \times T \times v_g$  的开关窗口是一样的(如图 2(b)), $n$  为整数, $T$  为时钟脉冲的重复周期。也就是说 SOA 偏离中点的距离为 1 cm,与偏离距离为  $(1 + n \times T \times v_g)$  cm 的情况下可以得到相同的窗口。

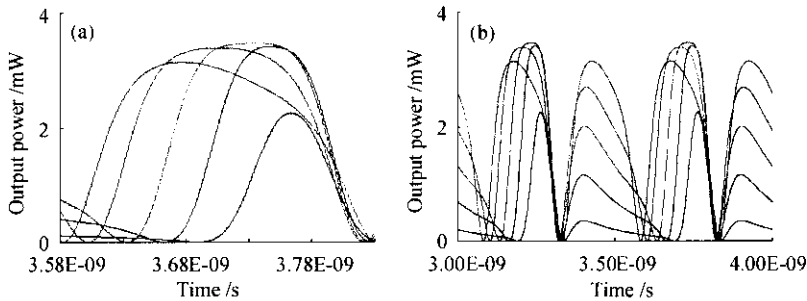


图 2 不同 SOA 非对称偏移量时 TOAD 开关窗口模拟图

Fig. 2 Simulation of variations of switching window of TOAD with the position offset of SOA

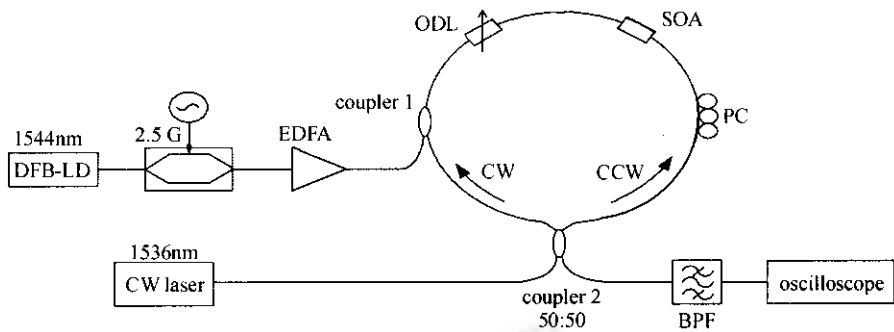


图 3 TOAD 实验装置图

Fig. 3 Experimental setup of TOAD

## 4 实验研究

图 3 为 TOAD 开关窗口实验的装置图。激光器输出的连续光经微波源产生的调制信号调制为近高斯脉冲,由掺铒光纤放大器(EDFA)放大后作为控制光从耦合器 1 进入 TOAD 环内,波长为 1544 nm,峰值功率为 1.74 mW,半最大值宽度约为 60 ps,脉冲重复周期为 400 ps。环路中放置光可变延时器(ODL)是用来调节 SOA 偏离环路中心的非对称偏移量  $\Delta x$ 。为了避免外界调节变化改变光纤的双折射特性而引起环内连续光的偏振态变化,采用了保偏耦合器及保偏光纤,并使用偏振控制器(PC)用来调节环路中的偏振态。信号脉冲方面采用连续光,波长为 1536 nm,功率约为 0.3 mW,对 SOA 增益

的影响可以忽略不计。经过耦合器 2 后的控制光脉冲用滤波器(BPF)滤掉。

图 4 为不同注入电流下的开关窗口。由于控制光功率很大,使得载流子消耗很快,SOA 迅速达到深度饱和,因此当注入电流改变时,饱和情况下的增益基本不变,但顺时针光和逆时针光之间的相位差会改变,进而带来开关窗口的变化。和数据模拟结果相同,注入电流太低时,SOA 不能提供足够大的增益及相位差,窗口的高度过小,不能达到开关作用。随注入电流的增大,增益的变化量及其引起的相位差变大,窗口的高度随之增加。但是若注入电流增大至 340 mA,如图 4(f),背景噪声将变大,对比度反而变差。而且电流太大会导致相位差超过  $\pi$ ,

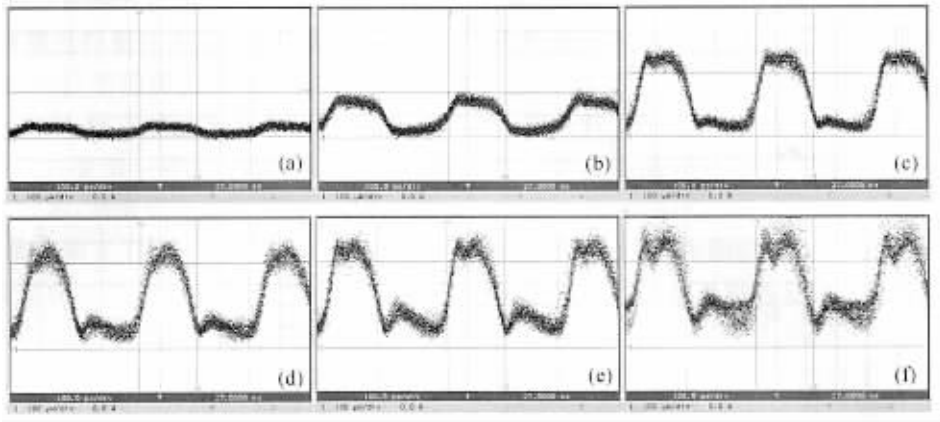


图 4 实验中不同注入电流下的开关窗口变化情况

Fig. 4 Experiment of variations of switching window of TOAD with injection current of SOA

( a ) 140 mA ; ( b ) 180 mA ; ( c ) 220 mA ; ( d ) 260 mA ; ( e ) 300 mA ; ( f ) 340 mA

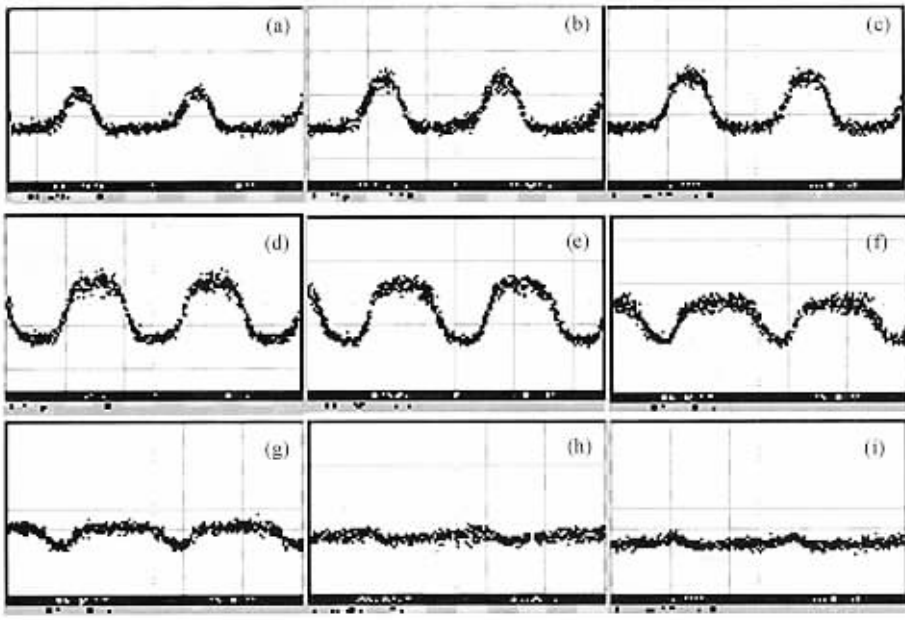


图 5 不同 SOA 非对称偏移量下的开关窗口

Fig. 5 Experiment of variations of switching window of TOAD with the position asymmetry of SOA

( a ) 0 cm ; ( b ) 1 cm ; ( c ) 2 cm ; ( d ) 4 cm ; ( e ) 5 cm ; ( f ) 7 cm ; ( g ) 8 cm ; ( h ) 10 cm ; ( i ) 11 cm

窗口平台上会出现一个低谷,同时导致窗口高度增加,使 TOAD 的开关性能变差。考虑到实验时器件性能的影响,与图 1 比较可以看出,数据模拟和实验基本吻合。选择一个合适的 SOA 注入电流值,以保证在得到合适的相位差的同时,能避免窗口变形。本实验中当  $I = 220 \text{ mA}$  为窗口平台未出现双峰时注入电流的最大值,此时为最佳工作电流。

图 5 反映了 TOAD 开关窗口对 SOA 非对称偏移量的依赖关系。调节光可变延时器移动  $\Delta x$ , TOAD 环的总长度变化也为  $\Delta x$ ,则 SOA 相对于中点的偏移量为  $\Delta x/2$ 。实验中所用的光可变延

时器最大延时长度为 11 cm,顺时针光和逆时针光之间可改变的最大时延量为 367 ps。而实验所用控制脉冲的重复周期为 400 ps。实验时,光可变延时器每次改变 1 cm,记录一个开关窗口的波形。

实验中,通过调节偏振控制器始终使一个窗口明显压制另一个窗口,因此所记录的窗口始终是同一个窗口。图 5(a) 中的开关窗口宽度约为 50 ps,由于受到控制脉宽的限制,因而窗口高度较小。继续增加光可变延时量,可以观察到开关窗口逐渐加宽。与图 2 比较,实验测得的数据与模拟值在 1~5 cm 之间吻合得很好。当偏移量决定的窗口宽度为

控制脉冲周期的一半后,窗口趋于消失。

## 5 结 论

本文对 TOAD 的工作原理进行了阐述,并通过数值模拟和实验分析了 SOA 的注入电流和偏移量对 TOAD 开关窗口的影响,得到了实验中的 SOA 最佳工作电流。TOAD 开关窗口的大小和 SOA 在环路中的偏移量有关,由于实验中用连续光代替信号脉冲以观察开关窗口,可以看到随着偏移量的增大,开关窗口的主窗口的宽度先增大,当偏移量决定的窗口宽度为控制脉冲周期的一半后,开关窗口的主窗口的宽度又会变小。通过上面的分析验证了这两个 TOAD 开关窗口的影响因素。

### 参 考 文 献

- 1 Leaf A. Jiang, Erich P. Ippen, Uwe Feiste *et al.*. Sampling pulse with semiconductor optical amplifiers [ J ]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2001, **37**( 1 ): 118 ~ 125
- 2 Pang Huan-gang, Zhang Zhi-yuan, Yan Sen-lin *et al.*. Study on the switching characteristics of TOAD [ J ]. *Chinese J. Lasers*, 2001, **A28**( 7 ): 641 ~ 644
- 3 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
- 3 Pang Huan-gang, He Jinlin, Zhang Zhiyuan *et al.*. Influence of the small signal and loop ' s time asymmetry on the switching characteristics of TOAD [ J ]. *Journal of Southeast University ( Natural Science Edition )*, 2000, **30**( 3 ): 36 ~ 40
- 逢焕刚,何瑾林,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( 自然科学版)*, 2000, **30**( 3 ): 36 ~ 40
- 4 LiuXianbing, Ye Peida. The effect of NLE-offset on the switching window of TOAD [ J ]. *Optical Communication Technology*, 1999, **23**( 4 ): 310 ~ 314
- 刘贤炳,叶培大. 非线性元件的偏移量对 TOAD 开关窗口的影响 [ J ]. *光通信技术*, 1999, **23**( 4 ): 310 ~ 314
- 5 J. M. Tang, P. S. Spencer, P. Rees *et al.*. Enhanced TOAD performance by negative frequency-detuned signal and control picosecond optical pulses [ J ]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2000, **36**( 5 ): 574 ~ 581
- 6 M. Usami, R. Inohara, K. Nishimura *et al.*. Experimental analysis of cross gain modulation and cross phase modulation in SOA with assist light injection [ C ]. *LEOS Summer Topi*, 2002. 21 ~ 22
- 7 J. M. Tang, P. S. Spencer, K. A. Shore. Analysis of operating characteristics of TOADs using gain saturation and nonlinear gain in SOAs [ J ]. *IEE Proceedings-Optoelectronics*, 1998, **145**( 1 ): 83 ~ 87