

利用开关窗口连续可调的太赫兹非对称解复用器 实现归零码占空比调节

孙振超 王智 吴重庆 王甫 林青 简阳天

(北京交通大学理学院光信息科学与技术研究所发光与光信息技术教育部重点实验室, 北京 100044)

摘要 提出利用开关窗口连续可调的太赫兹非对称解复用器(TOAD)实现对归零(RZ)码占空比的调节,分析了半导体光放大器(SOA)载流子恢复时间对伴随窗口的影响。实验上对 2.5 Gb/s 的 RZ 码占空比进行调节,实现了由 50%(200 ps)压缩到 25%(100 ps)和 10%(40 ps),以及由 25%展宽到 50%。进一步研究结果表明,该结构对占空比展宽有上限,但对占空比的压缩上限远远不止实验中的 40 ps,如果继续减小开关窗口宽度,利用该结构可以获得更小占空比 RZ 脉冲信号,实现皮秒甚至亚皮秒窄脉冲。

关键词 光通信;光信号处理;占空比调节;太赫兹非对称解复用器;伴随窗口;半导体光放大器

中图分类号 TN247 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.1209003

Tailoring Return to Zero-Code Duty Ratio Using a Continuous Adjustable Switch Window Terahertz Optical Asymmetrical Demultiplexer

Sun Zhenchao Wang Zhi Wu Chongqing Wang Fu Lin Qing Jian Yangtian

(Key Laboratory of Luminescence and Optical Information of Ministry of Education, Institute of Optical Information, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract The method of using the continuously adjustable terahertz optical asymmetrical demultiplexer (TOAD) structure to tailor the duty ratio of return to zero (RZ) code is proposed. And the dependence of the additional window on the recovery time of semiconductor optical amplifier (SOA) in the TOAD loop is analyzed. For 2.5 Gb/s RZ code, experiments are demonstrated to compress the duty ratio from 50% (200 ps) to 25% (100 ps) and then 10% (40 ps), and broaden from 25% to 50%. The experiments indicate that with the TOAD structure, the duty ratio can be broadened up to 100% (RZ to NRZ), and can be narrow to picosecond or even sub-picosecond, if the switch window of the TOAD is tuned narrower.

Key words optical communications; optical signal processing; pulse duty regulating; Terahertz optical asymmetrical demultiplexer; additional window; semiconductor optical amplifier

OCIS codes 190.4360; 220.4610; 260.3160

1 引言

归零(RZ)码因其具有脉冲窄、峰值功率较高和平均功率较低、信噪比较高和误码率较低、抗自相位

调制(SPM)能力强以及定时丰富等优点被广泛应用于光时分复用(OTDM)和光波分复用(WDM)系统以及光信号处理中。但是根据具体需要的不同,

收稿日期: 2014-06-10; 收到修改稿日期: 2014-07-28

基金项目: 国家自然科学基金(61077048,61077014)、高等学校博士学科点专项科研基金(20120009110032)、北京市自然科学基金(4132035)

作者简介: 孙振超(1986—),男,博士,主要从事伪随机码的发生和倍速等方面的研究。E-mail: 11118409@bjtu.edu.cn

导师简介: 王智(1971—),男,教授,博士,主要从事光纤通信、集成光电子器件和全光信号处理等方面的研究。

E-mail: zhiwang@bjtu.edu.cn(通信联系人)

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

往往对 RZ 码的占空比有一定要求,因此,通常需要将原 RZ 码进行占空比调节,使其满足条件后进行下一步应用。例如 Kouloumentas 等^[1]提出伪随机二进制序列(PRBS)倍速方案,对 RZ 码的占空比有比较严格的要求。目前 RZ 码与非归零(NRZ)码之间可调占空比转换的报道比较多,方案各异^[2-6],但是对于 RZ 码本身占空比调节的研究较少。

另一方面,太赫兹非对称解复用器^[7](TOAD)是在半导体光放大器(SOA)的基础上发展起来的一种高速全光开关器件。现阶段,高速全光开关研究的重点在石英光纤和半导体材料。用石英材料制成的光开关速度能达到 10 Tb/s,但其缺点是所需的功率高,相反地,半导体材料制成的光开关所需能量较小(100 fJ),但是速度较慢。采用石英光纤的全光开关是基于非线性光纤环镜(NOLM)^[8-9],用半导体光放大器的全光开关主要是基于马赫-曾德尔(M-Z)干涉仪^[10]结构。TOAD 结构将二者有效地结合,具有简单易集成、对外界环境扰动不敏感等优点。

综合以上两方面,本文提出利用开关窗口连续可调的 TOAD 对 RZ 码的占空比进行调节。分析了脉冲宽度调节中出现的伴随窗口的特性,实验上对 2.5 Gb/s 的 RZ 码占空比进行调节,实现了由 50% (200 ps)压缩到 25%(100 ps)和 10%(40 ps),以及由 25%展宽到 50%的信号输出。另外,通过建立模型重点分析了抑制伴随窗口产生的相关因素。基于本文的研究,该结构对占空比展宽有上限,但对占空比的压缩上限远远不止实验中的 40 ps,如果继续减小开关窗口宽度,利用该结构可以获得更小占空比 RZ 脉冲信号,实现皮秒甚至亚皮秒窄脉冲输出。

2 理论模型

TOAD 环的基本结构如图 1 所示,激光器(LD)2 作为连续光注入,控制脉冲由 WDM1 注入,假定在 TOAD 环中,偏振方向保持不变,控制脉冲光功率远大于信号光功率,SOA 的增益完全由控制脉冲决定,则可用文献[11]提出的理论模型对其进行研究。

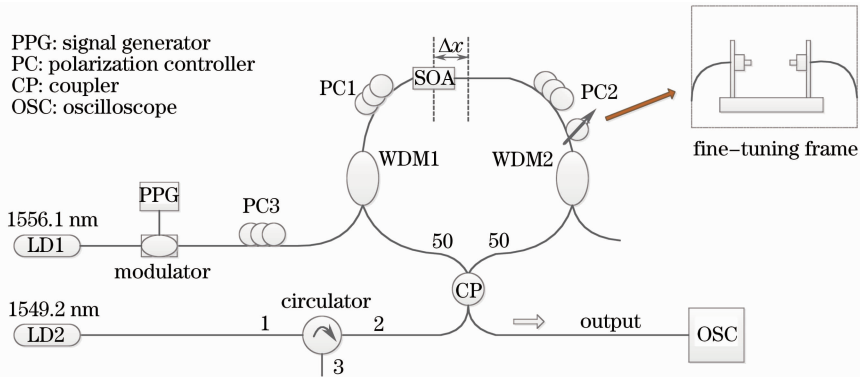


图 1 开关窗口可调 TOAD 的基本结构

Fig. 1 Basic structure of TOAD with an adjustable switch window

2.1 脉冲宽度调节的影响因素

改变 TOAD 窗口宽度,可以实现 RZ 码占空比压缩和展宽,理论计算结果如图 2 所示。SOA 的载流子恢复时间为 200 ps,其中图 2(a)为宽度 100 ps 的控制脉冲;图 2(b)为开关窗口分别为 20、50、80 ps 时 TOAD 的输出脉冲,从图 2(b)中可以看到脉冲宽度被压缩,压缩后的脉冲宽度由开关窗口大小决定,脉冲宽度减小脉冲的峰值功率也会随之减小;图 2(c)为宽度 40 ps 的控制脉冲;图 2(d)为开关窗口 50、70、100 ps 时 TOAD 的输出脉冲,从图 2(d)中可以看到脉冲被展宽,展宽后的脉冲宽度由开

关窗口大小决定。

需要指出,该结构对于脉冲的展宽是有上限的,如图 3 所示。其中图 3(a)为 SOA 载流子恢复时间 80 ps,开关窗口分别在 30、50、80、160、240 ps 时,TOAD 环的输出波形。图 3(b)为开关窗口与输出脉冲半峰全宽(FWHM)的关系,可以看出,当开关窗口增大到接近或超过载流子恢复时,输出脉冲宽度便不再随着开关窗口的增大而增大,且伴随窗口越来越大,从而演化成峰值间距等于窗口宽度的两个脉冲。

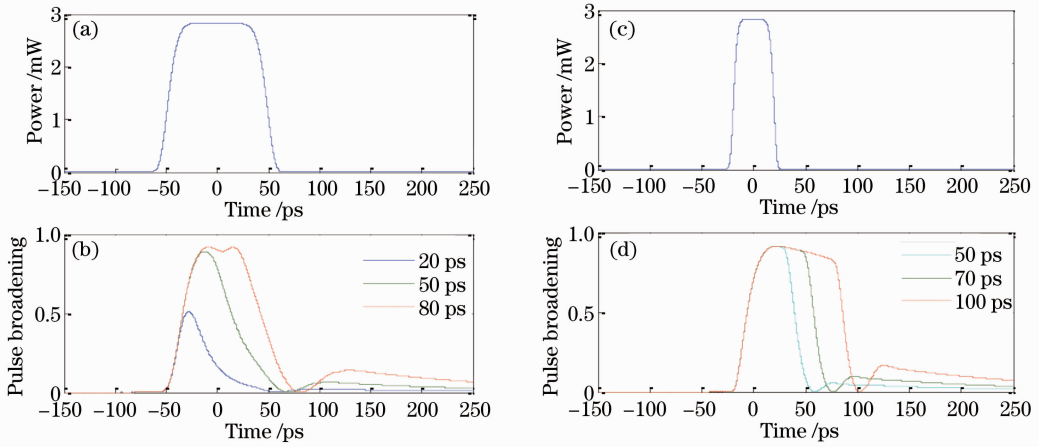


图 2 不同开关窗口下脉冲的压缩和展宽。(a) 100 ps 的控制脉冲；(b) 开关窗口 20、50、80 ps 时 TOAD 的输出脉冲；(c) 40 ps 的控制脉冲；(d) 开关窗口 50、70、100 ps 时 TOAD 的输出脉冲

Fig. 2 Pulse compression and broadening under different switch windows. (a) Control pulse of 100 ps; (b) output pulses of TOAD when the switch windows are 20, 50, 80 ps, respectively; (c) control pulse of 40 ps; (d) output pulses of TOAD when the switch windows are 20, 50, 80 ps, respectively

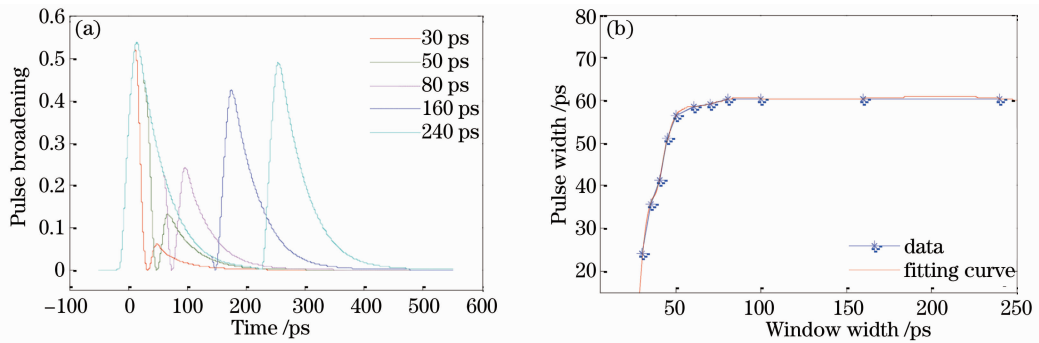


图 3 脉冲展宽与 SOA 载流子恢复时间关系。(a) SOA 载流子恢复时间 80 ps, 开关窗口为 30、50、80、160、240 ps 时, TOAD 环的输出波形; (b) 开关窗口与输出脉冲半峰全宽的关系曲线

Fig. 3 Relationship between pulse broadening and SOA carrier recovery time. (a) Output pulses of TOAD when recovery time of SOA is 80 ps and the switch windows are 30, 50, 80, 160, 240 ps, respectively; (b) relation curves of output pulse FWHM versus switch window width

2.2 伴随窗口的特性与抑制

在 TOAD 环输出的波形中,除主窗口控制的主脉冲,还会出现伴随窗口,如图 2(b), (d)所示。图 4 理论上分析了伴随窗口产生的原因。其中图 4(a)为控制脉冲(FWHM 为 100 ps);图 4(b)为顺时针光(CW)和逆时针光(CCW)的放大函数;图 4(c)为两束干涉光的相位差;图 4(d)为输出脉冲的波形。当控制光消失后,SOA 的载流子缓慢恢复,CW 光和 CCW 光之间仍然会有较小的相位差,回到耦合器干涉输出一个较小的脉冲,即伴随窗口,如图 4(d)所示。

伴随窗口的出现会影响输出信号的消光比,由伴随窗口的产生原因可知,SOA 载流子的恢复速度

对其产生重要影响。图 5(a)为开关窗口 40 ps,控制脉冲的宽度 250 ps 时,不同 SOA 载流子恢复时间下 TOAD 的输出特性。SOA 载流子恢复时间由 50 ps 增加到 100 ps,伴随脉冲相对于主脉冲峰值功率比值由 47% 下降到 11%,由此可以得出,为了抑制伴随窗口,需满足开关窗口宽度远远小于 SOA 载流子恢复时间。在实际应用中,SOA 的载流子恢复速度通常为定值,为了抑制伴随窗口,可以减小开关窗口。图 5(b)为 SOA 载流子恢复时间为 100 ps,不同开关窗口下 TOAD 的输出波形。由该图可以看出开关窗口越小,伴随窗口越不明显,该特性有助于实现高速率的窄脉冲压缩。

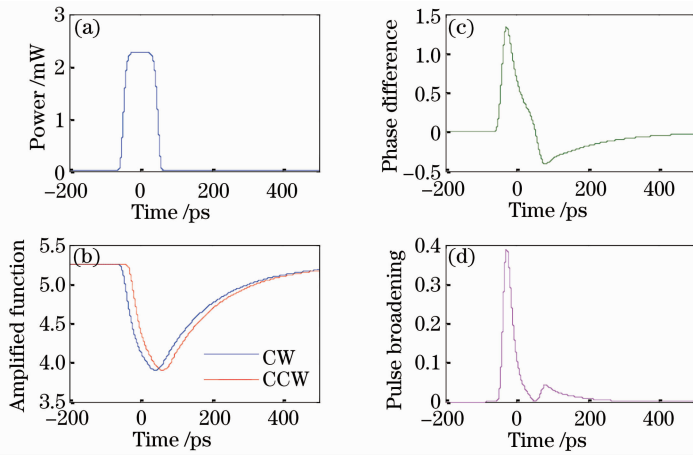


图 4 TOAD 环伴随窗口的产生。(a)控制脉冲；(b)顺时针光和逆时针光的放大函数；(c)两束干涉光的相位差；(d)输出脉冲的波形

Fig. 4 Generation of additional window. (a) Time domain shape of control pulse; (b) amplified function of CW and CCW pulses; (c) phase difference of interference pulses; (d) waveform of the output pulse

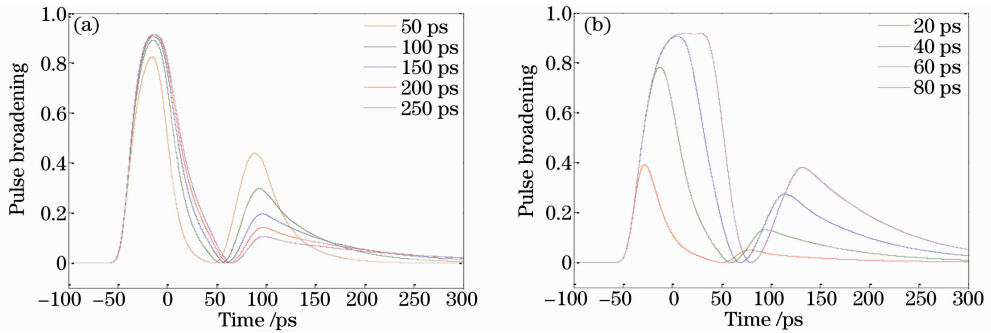


图 5 SOA 载流子恢复时间和控制脉冲速率对伴随窗口影响。(a) 开关窗口 40 ps,控制脉冲的宽度 250 ps 时,不同 SOA 载流子恢复时间下 TOAD 的输出特性曲线;(b) SOA 载流子恢复时间 100 ps,不同开关窗口下 TOAD 的输出波形

Fig. 5 SOA carrier recovery time and control pulse rate's influence on additional window. (a) Output pulses of TOAD versus different recovery times of SOA when the switch window is 40 ps and the control pulse is 250 ps; (b) output pulses of TOAD versus different switch windows when the recovery time of SOA is 100 ps

此外,TOAD 环中 CW 光和 CCW 光的偏振态也会影响两束光的干涉,但环中的偏振状态不能实时观测,于是可以通过观测实验结果来简单分析当

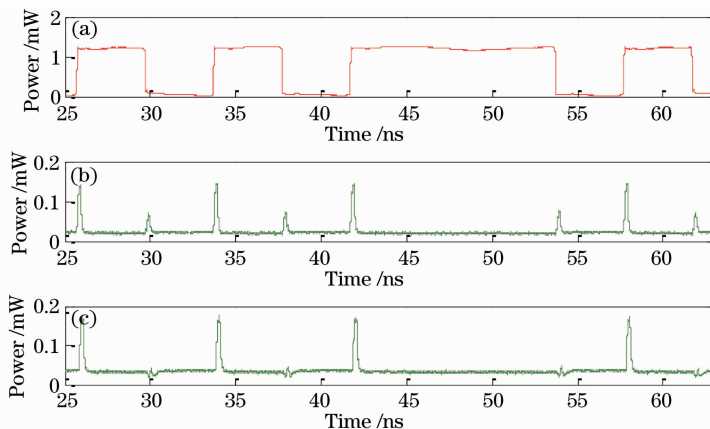


图 6 调节偏振态 TOAD 伴随窗口的抑制。(a) 输入的控制脉冲;(b)、(c) 调节偏振控制器后的输出结果

Fig. 6 Adjust the polarization to suppress the additional window. (a) Input control pulse; (b) and (c) output pulses after switching the polarization controller

前的偏振状态,其结果如图 6 所示。其中图 6(a)显示实验输入的控制脉冲,图 6(b)、(c)分别显示调节偏振控制器后得到的两种输出结果,由图 6(c)可以看出伴随窗口得到了很好地抑制,且偏振状态保持不变,在此条件下可以很好地实现 RZ 码的占空比脉冲压缩。

3 实 验

利用开关窗口连续可调的 TOAD 对 RZ 码占空比调节的实验装置如图 1 所示,激光器 LD1 的波长为 $\lambda_1 = 1556.1 \text{ nm}$,经过调制器调制,作为控制光经由 WDM1 注入 TOAD 环中,激光器 LD2 出射波长为 $\lambda_2 = 1549.5 \text{ nm}$ 的连续光,经过环形器的 1 端口从 50:50 的耦合器的一端注入,采用空间微调架作为可调光纤延迟器,来控制 TOAD 环开关窗口的大小,SOA 的载流子恢复时间约为 250 ps。当没有控制光时, λ_2 分为 CCW 光和 CW 光,经过 SOA 后,在耦合器中干涉,由原路返回,从环形器的 3 端口输

出;当有控制光时,CW 光和 CCW 光先后受到控制光的调制,回到耦合器中干涉,此时 λ_2 光不再全部由原路返回,而是一部分从 output 端口输出,注入 LeCroy LabMaster 8Zi 示波器中进行观测。

3.1 对 RZ 码占空比压缩

实验中对速率为 2.5 Gb/s 占空比为 50% 的 RZ 码进行压缩,其结果如图 7 所示。其中图 7(a)为输入脉冲的原 RZ 码;调节 TOAD 环的开关窗口为 40 ps,其输出的波形如图 7(b)所示,RZ 码的占空比被压缩为 10%,输出脉冲的半峰全宽约为 40 ps;逐渐增大 TOAD 环的开关窗口至 100 ps,可以得到不同占空比的 RZ 码,开关窗口为 100 ps 时,输出 RZ 码的占空比为 25%,如图 7(c)所示;图 7(d)、(e)、(f)分别为对应图 7(a)、(b)、(c)的眼图。由于可调延迟线,即空间微调架的调节范围为 30 ps 左右,开关窗口的调节范围在 60 ps 左右,实验上可以实现脉冲宽度在 40~100 ps 连续可调,且消光比保持在 10 dB 以上。

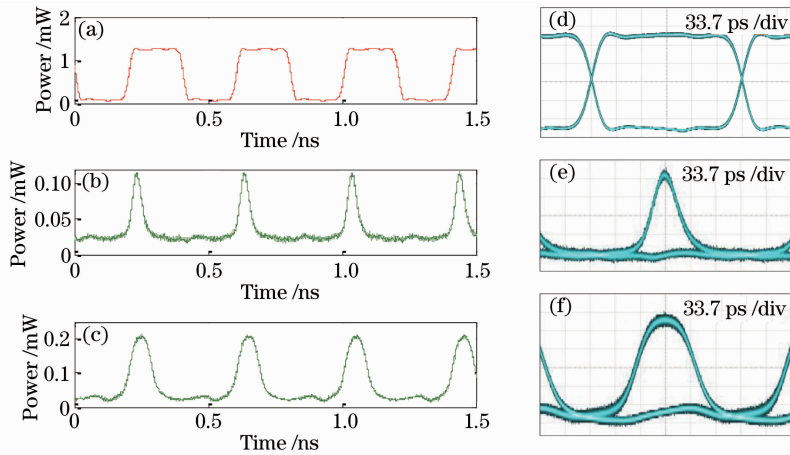


图 7 实验对 RZ 码占空比压缩结果及其眼图。(a) 原 RZ 码; (b) TOAD 环的开关窗口为 40 ps 输出的波形; (c) TOAD 环的开关窗口至 100 ps 输出的波形; (d)、(e)、(f) 为对应图(a)、(b)、(c) 的眼图

Fig. 7 RZ code duty ratio compression results and eye diagrams. (a) Original RZ code; (b) output pulse when the switch window of TOAD loop is 40 ps; (c) output pulse when the switch window of TOAD loop is 100 ps; (d)、(e)、(f) are the corresponding eye diagrams of (a)、(b)、(c)

3.2 对 RZ 码占空比展宽

实验中对 2.5 Gb/s 占空比为 25% 的 RZ 码进行脉冲展宽,其结果如图 8 所示。其中图 8(a)为原 RZ 码;调节 TOAD 环的开关窗口为 200 ps,其输出的波形如图 8(b),RZ 码的占空比为 50%,输出脉冲的半峰全宽约为 200 ps,消光比在 10 dB 以上。

3.3 超窄占空比压缩

由于 SOA 载流子恢复时间的限制,脉冲展宽的宽度有上限,但是实验中实现的 40 ps 脉冲压缩

并非该结构所能实现的最小值,其速率可以远远高于 10 Gb/s。如果继续减小开关窗口,该结构可以将脉冲宽度压缩到十几皮秒或几个皮秒,甚至有可能达到飞秒量级,其仿真结果如图 9 所示。其中图 9(a)为半峰全宽为 40 ps 的控制脉冲,图 9(b)为不同开关窗口压缩下的脉冲输出,最小脉冲半峰全宽为 1 ps,此时输出功率大大减小,但是仍然有较好的消光比。综合分析可知,在未来结构集成之后,环长可以大幅度减小,因此可以很好地避免外界温度和

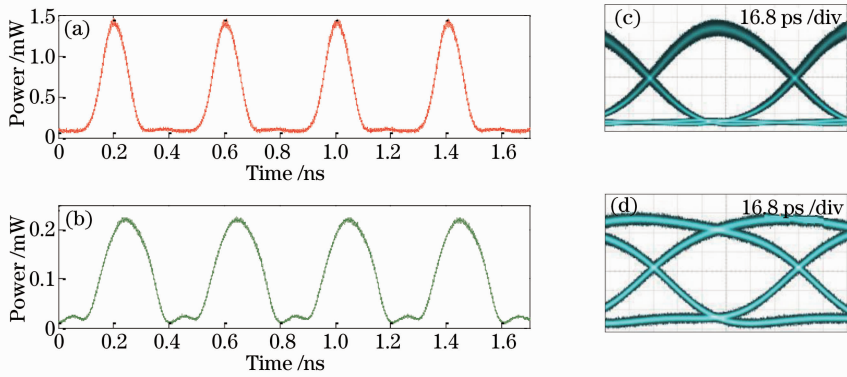


图 8 实验对 RZ 码脉冲展宽结果及其眼图。(a) 原 RZ 码;(b) TOAD 环的开关窗口为 200 ps,的输出波形;(c)、(d)为对应图(a)、(b)的眼图

Fig. 8 RZ code pulse broadening results and eye diagrams. (a) Original RZ code;(b) output pulse when the switch window of TOAD loop is 200 ps;(c)、(d) are the corresponding eye diagrams of (a)、(b)

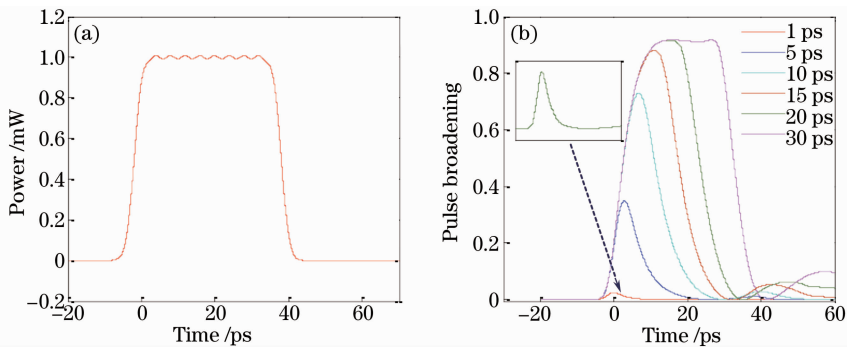


图 9 超窄占空比压缩数值模拟。(a) 半峰全宽为 40 ps 的控制脉冲;(b) 不同开关窗口压缩下的脉冲输出
Fig. 9 Numerical simulation of ultra narrow duty cycle compression. (a) Control pulse for which FWHM is 40 ps;(b) output pulse shapes under different switch windows

振动等因素的干扰,大大提高稳定性。

4 结 论

提出了利用开关窗口连续可调的 TOAD 对 RZ 码占空比进行调节,分析了 SOA 载流子恢复时间以及 TOAD 环中的偏振态演化对伴随窗口的影响。实验上对 2.5 Gb/s 的 RZ 码占空比进行调节,实现了由 50%(200 ps)压缩到 25%(100 ps)和 10%(40 ps),以及由 25%展宽到 50%。进一步研究表明,该结构对占空比展宽有上限,但对占空比的压缩上限远远不止实验中的 40 ps,如果继续减小开关窗口宽度,利用该结构可以获得更小占空比 RZ 脉冲信号,实现皮秒甚至亚皮秒窄脉冲。且该结构易于集成,集成之后可以获得更高的稳定性,因而有很好的应用前景。

参 考 文 献

1 Kouloumentas C, Stamatidis C, Zakyntinos P, *et al.*. Repetition rate multiplication of pseudorandom bit sequences[J]. *Photon Technol Lett, IEEE*, 2009, 21(7): 456-458.
2 Hui Zhanqiang, Zhang Jianguo. All-optical format conversion

from non-return-to-zero to return-to-zero based on dual-pump four-wave mixing in photonic crystal fiber [J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, 62(8): 084209.

惠战强, 张建国. 基于光子晶体光纤中双抽运四波混频效应的非归零到归零码型转换实验研究[J]. *物理学报*, 2013, 62(8): 084209.

3 Hui Zhanqiang, Zhang Jianguo. Recent progress in all-optical NRZ-to-RZ format conversion [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(6): 060003.

惠战强, 张建国. 全光非归零(NRZ)到归零(RZ)码型转换技术研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, 49(6): 060003.

4 Xu Jing, Jiang Yang, Zhou Yazhu, *et al.*. Return-to-zero/nonreturn-to-zero signal data format conversion based on microwave photonic filter[J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(9): 0905008.

徐 静, 江 阳, 周竹雅, 等. 基于微波光子滤波器的归零到非归零码型转换研究[J]. *中国激光*, 2012, 39(9): 0905008.

5 Ren Yan, Song Muping. Optical NRZ-to-RZ modulation format conversion based on cross-phase modulation effects in silicon micro-ring resonator [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(7): 0706002.

任 艳, 宋牟平. 基于硅基微环谐振器交叉相位调制效应的非归零信号到归零信号光调制格式转换[J]. *光学学报*, 2013 33(7): 0706002.

6 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]. *Chinese 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.
- 7 Sokoloff J P, Prucnal P R, Glesk I, *et al.*. A terahertz optical asymmetric demultiplexer (TOAD)[J]. Photon Technol Lett, IEEE, 1993, 5(7): 787—790.
- 8 Wang Wenrui, Yu Jinlong, Luo Jun, *et al.*. 40 Gb/s reconfigurable all-optical logic gate based on nonlinear optical loop mirror[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(5): 0506003.
王文睿, 于晋龙, 罗俊, 等. 基于非线性光纤环境的 40 Gb/s 可重构光逻辑门[J]. 光学学报, 2012, 32(5): 0506003.
- 9 de Dios C, Lamela H. Improvements to long-duration low-power gain-switching diode laser pulses using a highly nonlinear optical loop mirror: Theory and experiment[J]. J Lightwave Technol, 2011, 29(5): 700—707.
- 10 Zhang Limei, Wang Zhi, Chen Yingchuan, *et al.*. Simulation of 3-bit all optical comparator based on the cascade SOA-MZIs[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(s1): 191—195.
张丽梅, 王智, 陈颖川, 等. 基于半导体光放大器-马赫曾德尔干涉仪级联结构的全光 3 位比较器的仿真[J]. 中国激光, 2012, 39(s1): 191—195.
- 11 Feng Gang. The Theoretical Study of TOAD's Switching Characteristic [D]. Nanjing University of Science and Technology, 2003. 21—42.
冯刚. 太赫兹全光解复用器 (TOAD) 开关特性的理论研究 [D]. 南京理工大学, 2003. 21—42.

栏目编辑: 王晓琰