

# 全光伪随机码倍速关键技术

孙振超 王 智 刘岚岚 张丽梅 王 甫 刘英峰 吴重庆

(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** 提出了基于太赫兹光非对称解复用器(TOAD)结构来实现全光伪随机码(PRBS)倍速中全光波长变换及全光或逻辑运算两项关键技术的方案。对 TOAD 结构的开关特性进行了理论与实验研究, 并利用 TOAD 结构实现了 10 Gb/s 速率的波长变换和全光或逻辑的仿真与实验。结果表明: 继续减小控制脉冲宽度和开关窗口宽度, 利用 TOAD 结构可以获得更高速率的波长变换和全光或逻辑运算; 利用这两项关键技术, 基于 TOAD 结构可实现 PRBS 倍速, 获得更高速率的全光 PRBS 码流。

**关键词** 信号处理; 全光波长变换; 全光或逻辑; 太赫兹光非对称解复用器; 伪随机码倍速

**中图分类号** TN247 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0105008

## Key Techniques for All-Optical Repetition Rate Multiplication of Pseudorandom Bit Sequences

Sun Zhenchao Wang Zhi Liu Lanlan Zhang Limei Wang Fu  
Liu Yingfeng Wu Chongqing

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

**Abstract** A scheme is proposed to achieve all-optical wavelength conversion and all-optical OR-logic gate, which are two key techniques for repetition rate multiplication of pseudorandom bit sequences (PRBS) based on terahertz optical asymmetric demultiplexer (TOAD). The switch characteristics of TOAD are discussed followed by 10 Gb/s wavelength conversion and all-optical OR-logic gate with theoretical simulations and experiments. The results indicate that the wavelength conversion and all-optical OR-logic gate can be implemented at ultra-high bit rate by this TOAD scheme if the widths of control pulse and switch window are smaller. Furthermore, all-optical PRBS with higher rate can be generated by employing both of the key techniques to achieve the repetition rate multiplication of PRBS.

**Key words** signal processing; all-optical wavelength conversion; all-optical OR-logic gate; terahertz optical asymmetric demultiplexer; repetition rate multiplication of pseudorandom bit sequences

**OCIS codes** 190.4360; 220.4610; 260.3160

## 1 引 言

随着光通信技术的高速发展, 通信系统和网络的传输速率不断提高, 对于高速信号的误码检测、保密传输、扩频调制等方面都需要高速的伪随机码(PRBS)<sup>[1-5]</sup>。目前实验室内单信道光通信传输速

率已经达到 640 Gb/s, 然而高速电域 PRBS 发生器不但结构非常复杂, 而且成本很高, 特别是传输速度达到 40 Gb/s 以上时, 问题越来越突出<sup>[6-7]</sup>。针对这一问题, 高速全光 PRBS 发生器和对低速 PRBS 倍速的研究受到关注<sup>[8-9]</sup>。Kouloumentas 等<sup>[10]</sup>提

**收稿日期**: 2013-07-20; **收到修改稿日期**: 2013-08-21

**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)、中央高校基本科研业务费(2009JBM103, 2012JBM103)

**作者简介**: 孙振超(1986—), 男, 博士研究生, 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, 博士, 教授, 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(中国光学学会会员号: S040421081S)

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

出全域 PRBS 倍速方案,基于环长分别为 180 m 和 260 m 的萨尼亚克非线性光纤环,对  $2^7 - 1$  的 PRBS 序列实现了速率 12.5 Gb/s 到 50 Gb/s 的倍速。

文献[10]的全光 PRBS 倍速方案中,包括两个关键信号处理技术:全光波长变换和全光或逻辑。基于非线性光纤、半导体光放大器(SOA)、周期极化铌酸锂(PPLN)等介质中的非线性过程,都可实现这些信号处理。

基于 SOA 的太赫兹光非对称解复用器(TOAD)结构具有响应速度快、可集成、对外界环境扰动不敏感等优点。本文利用 TOAD 结构研究全光 PRBS 倍速系统中的关键技术,基于同一 TOAD 结构,从理论和实验上研究全光波长转换和全光或逻辑的输出特性。

## 2 TOAD 的开关特性

TOAD 环的基本结构如图 1 所示,信号脉冲由端口 A 进入,控制脉冲由波分复用器 WDM1 进入,在 TOAD 环中,偏振方向保持不变,考虑到 SOA 的非线性压缩效应,SOA 中光的纵向传输方程可表示为<sup>[11]</sup>

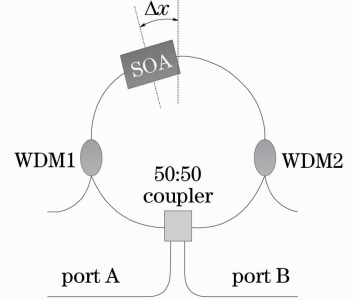


图 1 TOAD 环基本结构

Fig. 1 Basic structure of TOAD

$$\frac{\partial A_j(z,t)}{\partial z} + \frac{1}{v_g} \frac{\partial A_j(z,t)}{\partial t} = -\frac{1}{2} i \alpha g_0(z,t) A_j(z,t) + \frac{1}{2} g_0(z,t) A_j(z,t) - \frac{1}{2} \alpha_{\text{int}} A_j(z,t), \quad (1)$$

式中的  $A_j(z,t)$  ( $j = 1, 2, 3$ ) 表示光脉冲的慢变包络 [ $j = 1$  代表控制光,  $j = 2, 3$  代表逆时针(CCW)和顺时针(CW)的信号光],  $\alpha$  为线宽增强因子,  $g_0(z,t)$  为小信号增益,  $\alpha_{\text{int}}$  为波导内部损耗, 载流子密度随位置  $z$  和时间  $t$  的变化关系为<sup>[12]</sup>

$$\frac{\partial N}{\partial t} = \frac{1}{qV} - \frac{N}{\tau_c} - \frac{g_0(z,t)}{\hbar \omega_0 S} |A(z,t)|^2, \quad (2)$$

式中  $N$  为载流子密度,  $q$  为电子电量,  $V$  为有源区体积,  $\tau_c$  为自发载流子寿命,  $\hbar \omega_0$  表示光子能量,  $S$  为有源区横截面积,  $A(z,t)$  为光脉冲的慢包络。实验采用以群速度  $v_g$  移动的时延参考系, 增益  $G(z,T)$ 、光脉冲功率  $P_j(z,T)$  和相位  $\phi_j(z,T)$  满足

$$\frac{\partial G(z,T)}{\partial T} = \frac{g_0 - G(z,T)}{\tau_c} - \frac{1}{E_{\text{sat}}} \frac{G(z,T)}{1 + \epsilon P_1(z,T)} P_1(z,T), \quad (3)$$

$$\frac{\partial P_j(z,T)}{\partial z} = \left[ \frac{G(z,T)}{1 + \epsilon P_j(z,T)} - \alpha_{\text{int}} \right] P_j(z,T), \quad (4)$$

$$\frac{\partial \phi_j(z,T)}{\partial z} = -\frac{1}{2} \alpha \frac{G(z,T)}{1 + \epsilon P_j(z,T)}, \quad (5)$$

式中  $T = t - z/v_g$ ,  $\epsilon$  为非线性增益压缩因子 ( $\epsilon = \epsilon_{\text{CH}} + \epsilon_{\text{SHB}}$ ,  $\epsilon_{\text{CH}}$  为载流子加热的贡献,  $\epsilon_{\text{SHB}}$  为光谱烧孔的贡献),  $E_{\text{sat}}$  为饱和能量。假定控制脉冲光功率远远大于信号光功率, SOA 的增益完全由控制脉冲决定, 则放大函数  $h(T)$  可表示为

$$\frac{h(T)}{dT} = \frac{1}{1 + \epsilon P_{1,\text{in}}(T) \exp[h(T)]} \times \left\{ \frac{g_0 L - h(T)}{\tau_c} - \left( \frac{\epsilon}{\tau_c} + \frac{1}{E_{\text{sat}}} - 2\epsilon \frac{T}{T_0^2} \right) \times P_{1,\text{in}}(T) \{ \exp[h(T)] - 1 \} \right\}. \quad (6)$$

假定控制脉冲为无啁啾高斯脉冲, 其输入功率  $P_{1,\text{in}}$  可表示为

$$P_{1,\text{in}}(T) = \frac{E_{\text{inc}}}{T_0 \sqrt{\pi}} \exp\left(-\frac{T^2}{T_0^2}\right), \quad (7)$$

式中  $L$  为有源区长度,  $T_0$  表示控制脉冲半峰全宽

(FWHM),  $E_{\text{inc}}$  为控制脉冲的能量。本文涉及到的 SOA 参数如表 1 所示, 利用(6)、(7)式得到 SOA 的增益特性。SOA 在不同控制脉冲下的增益响应特性如图 2(a)所示, 当强控制脉冲注入时, SOA 的增益迅速减小达到饱和并缓慢恢复, 在脉冲宽度为

1 ps时,控制脉冲的能量越大,饱和增益就越小。如图 2(b)所示,在脉冲能量为 0.5 pJ 时,当控制脉冲宽度小于 1 ps 时,非线性压缩效应影响显著,增益

曲线迅速减小,产生一个下陷,此后又恢复到一个较低的水平,之后缓慢恢复。

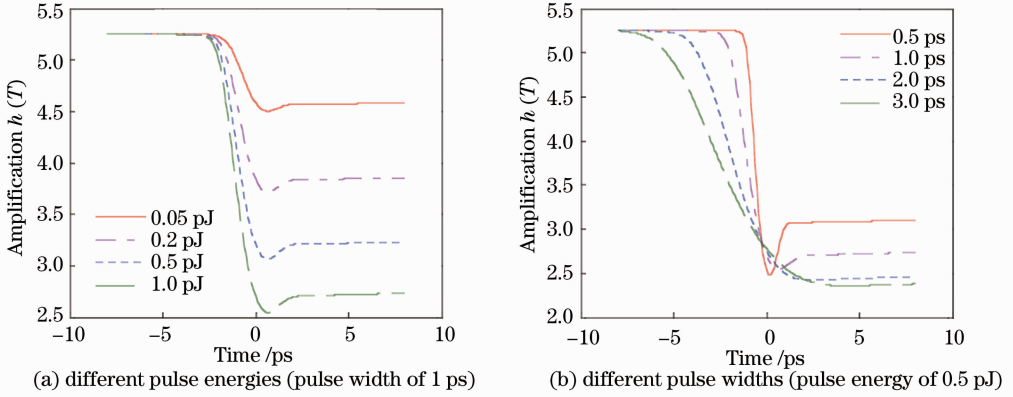


图 2 SOA 在不同控制脉冲下的增益响应特性

Fig. 2 Gain response characteristics of SOA with different control pulses

表 1 SOA 仿真参数

Table 1 SOA simulation parameters

Parameter	Value
Length of the active region $L / \mu\text{m}$	150
Carrier lifetime $\tau_c / \text{ps}$	500
Saturation energy $E_{\text{sat}} / \text{pJ}$	8
Linewidth enhancement factor $\alpha$	5.0
Nonlinear gain compression factor $\epsilon$	0.2
Small-signal gain $g_0 / \text{m}^{-1}$	$3.5 \times 10^4$
Internal linear loss $\alpha_{\text{int}} / \text{m}^{-1}$	2000

经过 SOA 后,信号光的功率和相位分别为

$$P_{j,\text{out}}(T) = P_{j,\text{in}}(T) \exp[h(T)], \quad (8)$$

$$\phi_{j,\text{out}}(T) = \phi_{j,\text{in}}(T) - \frac{1}{2} \alpha h(T). \quad (9)$$

CCW 光和 CW 光到达 SOA 的时间关系满足  $T_{\text{cw}} = T_{\text{ccw}} - 2\Delta t$ , 其中  $2\Delta t$  为非对称开关窗口 ( $\Delta t = \Delta x / v_{\text{loop}}$ ,  $v_{\text{loop}}$  为光在光纤 TOAD 环中的传播速度)。逆时针和顺时针两共轭信号光返回耦合器后的相位差为

$$\Delta\phi(T) = \frac{1}{2} \alpha [h(T_{\text{cw}}) - h(T_{\text{ccw}})]. \quad (10)$$

如果耦合器分光比为 50:50, 图 1 中的端口 A、B 的输出可表示为

$$P_A(T) = \frac{1}{4} P_{\text{in}}(T) \left\{ \exp[h(T_{\text{cw}})] + \exp[h(T_{\text{ccw}})] + 2 \exp\left[\frac{h(T_{\text{cw}}) + h(T_{\text{ccw}})}{2}\right] \cos\Delta\phi(T) \right\}, \quad (11)$$

$$P_B(T) = \frac{1}{4} P_{\text{in}}(T) \left\{ \exp[h(T_{\text{cw}})] + \exp[h(T_{\text{ccw}})] - 2 \exp\left[\frac{h(T_{\text{ccw}}) + h(T_{\text{cw}})}{2}\right] \cos\Delta\phi(T) \right\}. \quad (12)$$

端口 B 输出的归一化光功率  $P_{\text{bn}}$  可表示为

$$P_{\text{bn}} = \frac{P_B(T)}{P_A(T) + P_B(T)}. \quad (13)$$

利用(13)式进行仿真,连续光  $P_{\text{in}}(T)$  由端口 A 输入, WDM1 输入的控制脉冲是半峰全宽为 10 ps 的高斯脉冲, SOA 的载流子恢复时间为 500 ps。端口 B 输出光脉冲宽度与 TOAD 环的非对称开关窗口一致,不同开关窗口下 TOAD 的输出特性如图 3(a)所示,当非对称开关窗口的宽度大于控制脉冲宽度时,输出光脉冲峰值功率稳定且宽度随开关窗口而变;当非对称开关窗口的宽度小于控制脉冲宽度时,输出光脉冲峰值功率明显下降,但宽度仍然由开关窗口决定。

图 3(b)为开关窗口 40 ps 时, TOAD 环 B 端口在控制光能量为 0.02、0.05、0.1、0.2、0.5 pJ 时的输出结果。由图 3(b)可知,输出光功率随着控制光能量的增大,先增加,达到极值后开始减小,在控制光能量为 0.1 pJ 时输出功率最大。因此可以通过调节控制脉冲的能量来控制 TOAD 的输出脉冲功率。

SOA 的载流子恢复速度、开关窗口宽度以及控制脉冲宽度之间的关系对于基于 TOAD 的波长变换特性也有影响。不同 SOA 载流子恢复时间和不同控制脉冲宽度下 B 端口的输出特性如图 4 所示, A 端口注入连续光,开关窗口为 100 ps。图 4(a)为脉冲宽度 60 ps 时, SOA 在不同载流子恢复时间下

的 TOAD 输出波形,当载流子恢复时间接近甚至小于开关窗口宽度时,会出现明显的双峰现象。图 4(b)为 SOA 载流子恢复时间为 500 ps 时,不同

控制脉冲宽度下 TOAD 环的输出波形,当脉冲宽度大于开关窗口宽度时,双峰现象明显。

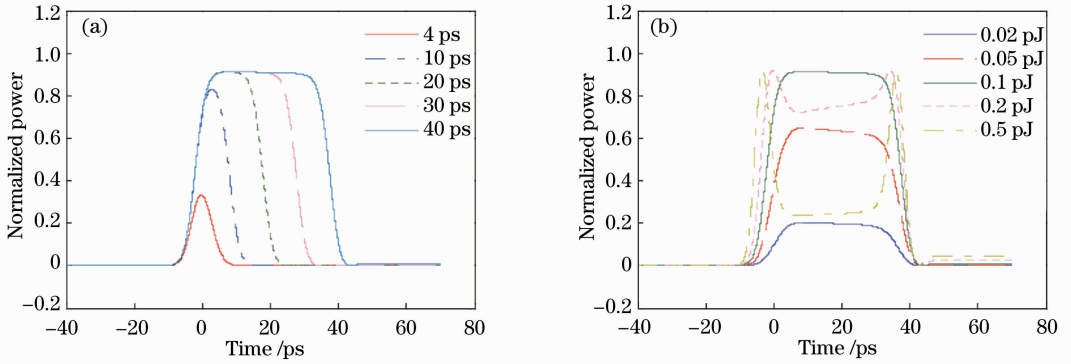


图 3 (a) 不同开关窗口以及(b)不同控制脉冲能量下 TOAD 的输出特性

Fig. 3 Output characteristics of TOAD at (a) different widths of window and (b) different energies of control pulse

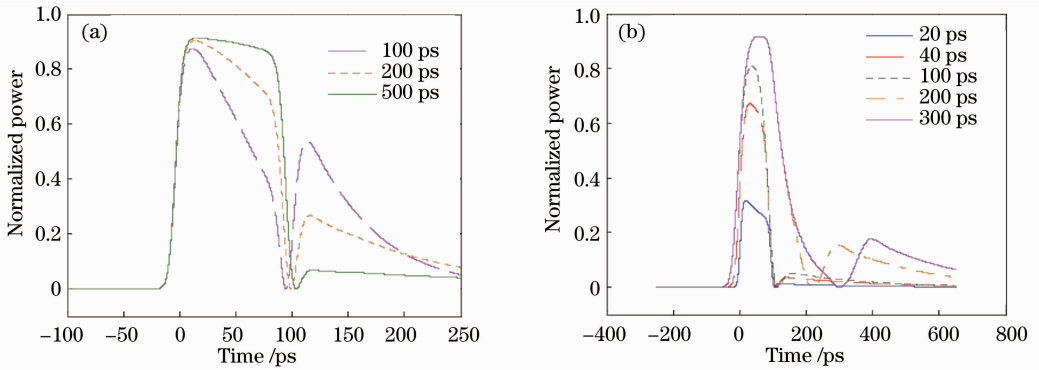


图 4 (a) 不同 SOA 载流子恢复时间和(b) 不同控制脉冲宽度下 B 端口的输出

Fig. 4 Outputs of port B at (a) different SOA carrier recovery times and (b) different control pulse widths

由此可知,为了使波长变换有较好的输出波形,需要满足 SOA 的载流子恢复时间远远大于非对称开关窗口宽度,同时控制脉冲的宽度需远远小于开关窗口宽度,在这里用  $T_{ctrl}$  来表示控制脉冲的宽度,即

$$T_{ctrl} \ll 2\Delta t \ll \tau_c. \quad (14)$$

图 5(a)为仿真的控制脉冲,(b)为 CW 和 CCW 光的增益曲线,(c)为波长变换的输出波形。控制脉冲的宽度为 1 ns,开关窗口为 150 ps,此时波长变换

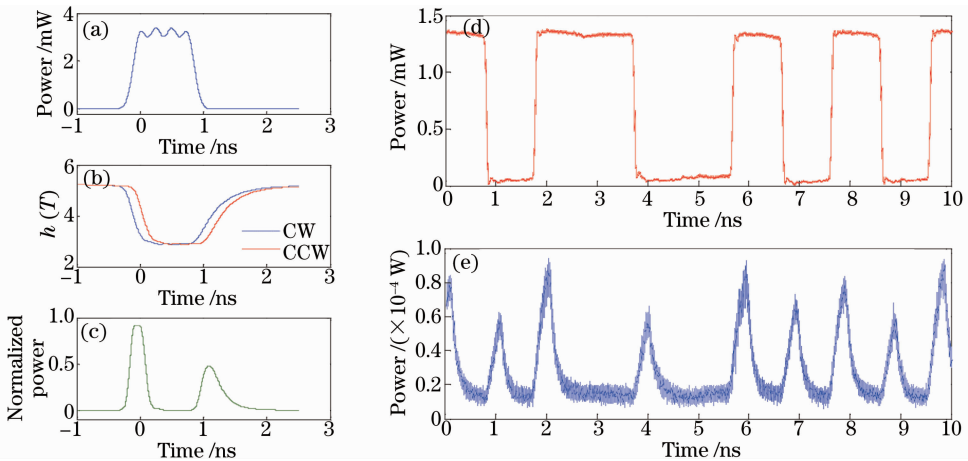


图 5 (a) 仿真的控制脉冲;(b) CW 和 CCW 光的增益曲线;(c) 仿真的双峰输出;(d) 实验的控制光;(e) 实验得到的双峰输出

Fig. 5 (a) Simulated control pulse; (b) CW and CCW optical gain curves; (c) simulated bimodal output;

(d) experimental control light; (e) experimental bimodal output

后出现了双峰。图 5(d)为实验中控制光波形,(e)为波长变换的输出波形,实验中用到的 SOA 的载流子恢复时间为 350 ps,开关窗口为 150 ps,控制脉冲为速率 1 Gb/s 的不归零(NRZ)码,码型为 1011001010,由图 5 可知,实验结果与理论吻合。

### 3 全光波长变换

基于 TOAD 实现波长变换的实验装置如图 6 所示。激光器 LD1 的波长为  $\lambda_1 = 1556.1 \text{ nm}$ ,经过

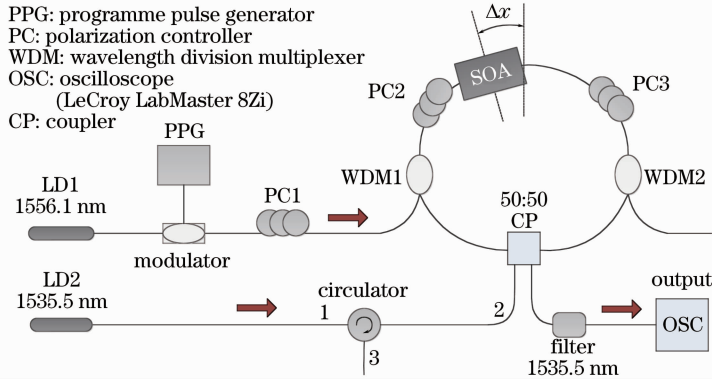


图 6 基于 TOAD 的波长变换实验装置

Fig. 6 Experimental setup of wavelength conversion based on TOAD

控制脉冲的宽度为 100 ps,非对称开关窗口宽度为 100 ps,波长变换结果如图 7 所示。图 7(a)为控制光的眼图( $\lambda_1 = 1556.1 \text{ nm}$ ), (b)为波长变换后的眼图( $\lambda_2 = 1535.5 \text{ nm}$ ),可以看出波长变换有较好的转换效率,并且波长变换后的脉冲相对于原控制脉冲略有展宽。

需要指出,实验上实现 10 Gb/s 波长转换是原理性的,该结构的转换速率可以远远高于 10 Gb/s,通过第 2 节的分析可知,只要满足(14)式,继续减小脉冲宽度和窗口宽度,可以得到脉宽达到飞秒量级的更高速率的波长变换。

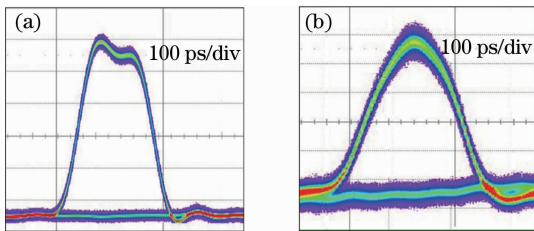


图 7 (a) 10 Gb/s 控制光眼图和(b) 波长变换眼图

Fig. 7 Eye-diagrams of (a) 10 Gb/s control pulse and (b) wavelength conversion

### 4 全光或逻辑

实现 PRBS 倍速的另一个关键技术是全光或逻辑

调制器的调制,作为控制光经由 WDM1 注入 TOAD 环中,激光器 LD2 出射波长为  $\lambda_2 = 1535.5 \text{ nm}$  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 TOAD。当没有控制光时, $\lambda_2$  光分为 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  $\lambda_2$  光不再从原路返回,经滤波器滤波后输出。

辑运算,结构类似于上述的波长变换,但此时的控制光不再是单路信号,而是两路不同码型的控制光。在实验中,采用延迟复用的办法,将控制光分为两束,其中一路延迟 1 bit,再将两路光合并起来,经过掺铒光纤放大器(EDFA)放大和可调衰减器调节后注入 TOAD 环中,结构如图 8 所示。

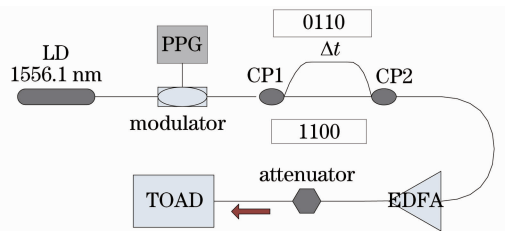


图 8 不同码型控制光发生装置的实验装置

Fig. 8 Experimental setup for different control pulse generators

由第 3 节的理论分析可知,TOAD 环的输出脉冲功率与控制光脉冲的功率有关,而且随着控制光脉冲功率的增加,输出脉冲功率有极值,此时控制光的功率继续增加,输出脉冲功率开始减小。实验中,调节可调衰减器改变控制光能量,使得控制光为 1 1 时的输出功率与控制光为 1 0、0 1 时的输出功率相等,即实现全光或逻辑运算,两路 10 Gb/s 速率控制光的码型分别为 0110 和 1100,输出结果为 1110。



图 9(a)、(b)、(c)为码型 1100 和 0110 及输出结果 1110 的理论仿真结果,图 9(d)、(e)、(f)为相对应的实验结果,二者吻合。从图 9(f)中可以看出,运算后的脉冲相对于原信号略有展宽,这是由于测量误

差使得开关窗口非严格等于 100 ps 引起的。同理于波长变换,减小控制脉冲宽度和开关窗口宽度,同样可以得到更高速率的或逻辑。

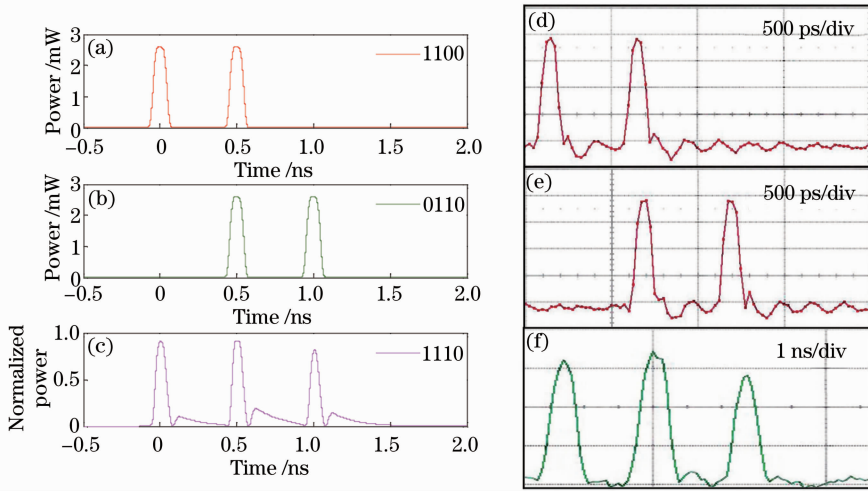


图 9 基于 TOAD 实现全光或逻辑的理论仿真及实验结果。(a)、(b)分别为码型为 1100、0110 的仿真控制光；(c)为码型为 1110 的仿真输出；(d)、(e)、(f)分别为(a)、(b)、(c)对应的实验结果

Fig.9 Theoretical simulation and experimental results of all-optical OR-logic gate based on TOAD. (a) Simulation control light (1100); (b) simulation control light (0110); (c) simulation output (1110); (d), (e) and (f) are the corresponding experimental results of (a), (b) and (c), respectively

## 5 结 论

对 TOAD 结构的开关特性进行了理论与实验研究,分析了波长变换时的双峰输出现象,实验实现了 10 Gb/s 速率的波长变换。理论仿真和实验实现了 10 Gb/s 全光或逻辑运算。如果继续减小控制脉冲宽度和开关窗口宽度,利用 TOAD 结构可以获得更高速率的波长变换和全光或逻辑运算。进一步地,利用这两项关键技术,基于 TOAD 结构可完成 PRBS 的倍速,获得 40 Gb/s 以上全光 PRBS 码流。

## 参 考 文 献

- 1 S Lesecq, A Barraud. A PRBS with exactly zero correlation and its application[C]. 16th Mediterranean Conference on Control and Automation, 2008. 724-728.
- 2 Yang Fu, He Yan, Chen Weibiao. Study of fiber laser ranging system using pseudorandom modulation and single photon counting techniques [J]. Chinese J Lasers, 2011, 38 (3): 0314003.
- 杨 馥, 贺 岩, 陈卫标. 基于伪随机码调制和单光子计数的光纤激光测距研究[J]. 中国激光, 2011, 38(3): 0314003.
- 3 Yang Fu, He Yan, Zhou Tianhua, et al.. Simulation of spaceborne altimeter based on pseudorandom modulation and single-photon counting[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(1): 21-26.
- 杨 馥, 贺 岩, 周田华, 等. 基于伪随机码调制和单光子计数的星载测高仿真[J]. 光学学报, 2009, 29(1): 21-26.
- 4 Yang Fang, Zhang Xin, He Yan, et al.. Laser ranging system based on high speed pseudorandom modulation and photon counting techniques [J]. Chinese J Lasers, 2013, 40 (2):

- 0208001.
- 杨 芳, 张 鑫, 贺 岩, 等. 基于高速伪随机码调制和光子计数激光测距技术[J]. 中国激光, 2013, 40(2): 0208001.
- 5 Buchali F, Dischler R, Klekamp A, et al.. Realisation of a real-time 12.1 Gb/s optical OFDM transmitter and its application in a 109 Gb/s transmission system with coherent reception [C]. European Conference on Optical Communication, 2009.
- 6 M Galili, L K Oxenlowe, H C H Mulvad, et al.. Optical wavelength conversion by cross-phase modulation of data signals up to 640 Gb/s[J]. IEEE J Sel Top Quantum Electron, 2008, 14 (3): 573-579.
- 7 H C H Mulvad, E Tangdiongga, O Raz, et al.. 640 Gbit/s OTDM lab-transmission and 320 Gbit/s field-transmission with SOA-based clock recovery[C]. OFC, 2008. 24-28.
- 8 Tanay Chattopadhyay, Tamer A Moniem, HIRAK Kumar Maity. All-optical pseudorandom binary sequence (PRBS) generator using the hardlimiters[J]. Optik, 2013, 124(20): 4252-4256.
- 9 Christen L, Yilmaz O, Nuccio S, et al.. Optical pseudo-random bit sequence generator using a dual-drive Mach-Zehnder modulator as a linear feedback shift register[C]. LEOS, 2008. 274-275.
- 10 Kouloumentas C, Stamatiadis C, Zakyntinos P, et al.. Repetition rate multiplication of pseudorandom bit sequences[J]. IEEE Photon Technol Lett, 2009, 21(7): 456-458.
- 11 Agrawal G P, Olsson N A. Self-phase modulation and spectral broadening of optical pulses in semiconductor laser amplifiers[J]. IEEE J Quantum Electron, 1989, 25(11): 2297-2306.
- 12 Feng Gang. The Theoretical Study of TOAD's Switching Characteristic[D]. Nanjing: 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: 南京理工大学, 2003. 21-42.

栏目编辑: 史 敏