

基于太赫兹光非对称解复用器的全光倍频技术

简阳天 王 智 林 青 孙振超 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 太赫兹光非对称解复用器(TOAD)是一种全光信号处理领域中常用的器件,其具有响应速度快、可集成、稳定性好等优点。本文提出了一种基于TOAD的全光时钟倍频技术方案。通过模型仿真,模拟对TOAD输入直流光,在时钟脉冲前后沿附近会产生双峰输出现象,以此来分析TOAD的开关特性,研究了控制光能量、开关窗口大小、半导体光放大器增益恢复时间等因素对双峰输出特性的影响。对光时钟信号进行了全光二倍频、三倍频和四倍频的仿真,从频谱上观察,倍频准确,并且在实验上实现了200 Mb/s和1 Gb/s时钟的全光二倍频,与仿真结果相符。

关键词 信号处理;全光倍频;太赫兹光非对称解复用器;光导体光放大器

图文分类号 TN929 **文献标识码** A

doi: 10.3788/CJL201542.0205002

All Optical Frequency Multiplication Technology Based on Terahertz Optical Asymmetric De-Multiplexer

Jian Yangtian Wang Zhi Lin Qing Sun Zhenchao 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 Terahertz optical asymmetric de-multiplexer (TOAD) is one of the key devices for all-optical signal processing with its fast response, good integration and stability. A scheme for all optical frequency multiplication is proposed based on the TOAD. The switch characteristics of the TOAD are discussed with simulations for bimodal output on the leading and tailing edges of the clock pulse as control, in addition with the dependence on some factors of the TOAD, such as energy of control pulse, window of TOAD, carrier recovery time. Based on the bimodal output effects, the all-optical frequency doubling, tripling and quadrupling are simulated, and the frequency doubling of the clock is implemented with simulations and experiments for 200 Mb/s and 1 Gb/s clocks.

Key words signal processing; all optical frequency multiplication; terahertz optical asymmetric de-multiplexer; semiconductor optical amplifier

OCIS codes 060.4510; 190.4360; 200.3050; 200.6715

1 引 言

太赫兹光非对称解复用器(TOAD)^[1]是采用 Sagnac 干涉仪结构的半导体光放大器(SOA)环路镜,它是基于 SOA 中的交叉增益调制(XGM)和交叉相位调制(XPM)来实现全光开关。TOAD 结构具有响应速度快、可集成、稳定性好、开关能量较小等优点^[2],它除了可用作光时分复用技术(OTDM)中的解复用器,还可以作为全光光

收稿日期:2014-07-15;收到修改稿日期:2014-09-04

基金项目:北京市自然科学基金(4132035)、中央高校基本科研业务费(2012JBM103)、高等学校博士学科点专项科研基金(20120009110032)

作者简介:简阳天(1987—),男,硕士研究生,主要从事光纤通信和全光信号处理等方面的研究。

E-mail: 10121907@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等处理方面的研究。

E-mail: zhiwang@bjtu.edu.cn

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

开关用作全光 3R(再放大、再定时、再整形)再生中的光判决门^[3],常应用于各种全光信号处理领域。

近年来,国内外许多人提出了各种基于 TOAD 的光信号处理领域中的新方案和新技术,闫玉梅等^[4]基于 TOAD,利用从非归零码信号中全光提取的时钟实现了 10 Gb/s 非归零码到归零码的码型转换;Gayen 等^[5]利用 TOAD 搭建了一种新型全光前缀树型加法器,提高了运算速度和精度;Maity 等^[6]用 TOAD 实现了全光二进制触发器,是全光包交换网络的重要器件;Fok 等^[7]提出了一种基于 TOAD 的异或逻辑门,实验成功实现了 8 位 5 Gb/s 信号的异或逻辑。也有许多器件是在 TOAD 结构的基础上进行改进,实现了新的功能,王拥军等^[8]提出的级联型双环耦合全光缓存器(DLOB)就是在类似 TOAD 结构的基础上进行改进,采用了双环结构实现全光缓存器。非线性光学环路镜(NOLM)与 TOAD 也有类似的结构,在光信号处理领域有广泛的应用^[9],彭拥军等^[10]对 NOLM 进行双向抽运,利用特定条件下输出载波谱线会被明显抑制的特性实现了全光时钟倍频。

本文通过对 TOAD 开关特性的研究,重点分析输入直流光时时钟脉冲前后沿附近的双峰输出现象,仿真分析了控制光能量、窗口大小、SOA 增益恢复时间等因素对双峰现象的影响,并基于此提出一种全光倍频技术方案,理论仿真了二、三、四倍频,实验实现了二倍频。

2 TOAD 的开关特性和双峰输出

TOAD 结构如图 1(a)所示,SOA 偏离 TOAD 中心位置的距离为 Δx 。在输入端输入直流光时,当顺时针方向(CW)光和逆时针方向(CCW)光经过 TOAD 一周之后,由 SOA 获得的增益和相位调制相同,在返回耦合器后全部反射回输入端。当控制端有时钟脉冲输入时,SOA 对输入光的增益和相位进行调制,如图 1 所示,CW 光比 CCW 光先到达 SOA,二者到达时间差为 $\Delta t = 2\Delta x/v_{loop}$,通过调整 SOA 的驱动电流,可使 CW 光和 CCW 光通过 SOA 后的相位调制出现 π 相移,可在控制脉冲的前沿和后沿产生相位差,返回耦合器时干涉输出两个脉冲,这就是实验中观察到的双峰输出现象,如图 1(b)所示。

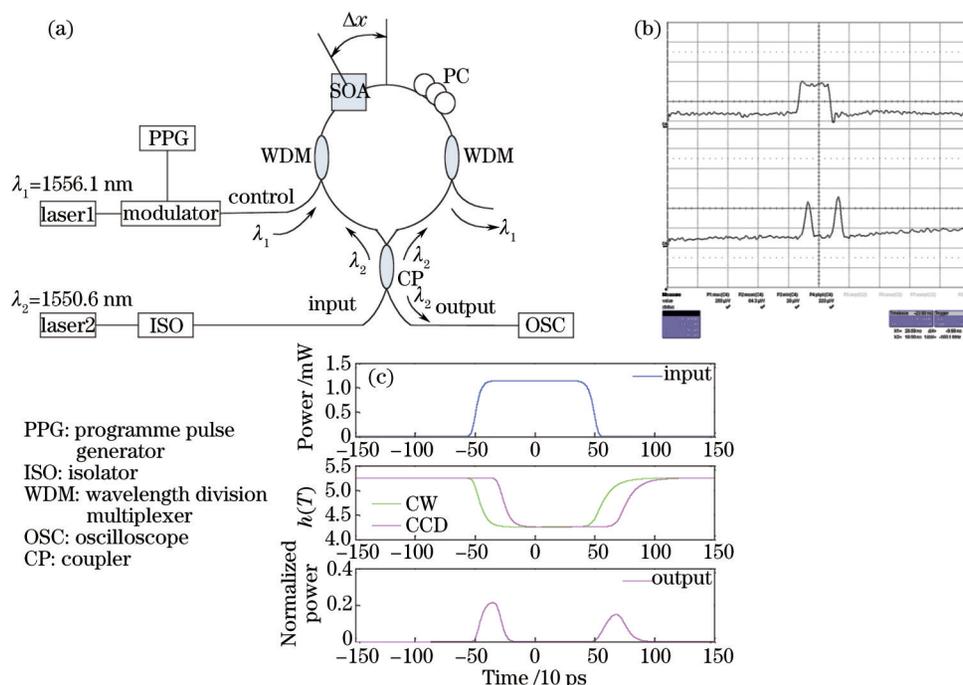


图 1 (a) 实验系统图; (b) 实验双峰现象; (c) 仿真双峰现象

Fig.1 (a) Experimental setup; (b) experimental TOAD bimodal output; (c) simulation TOAD bimodal output

利用文献[11]中的模型,对 TOAD 进行仿真,SOA 仿真参数如表 1 所示。在 TOAD 输入端输入直流光,控制端输入信号光,在 TOAD 的输出端观察输出波形,仿真中选取 SOA 的增益恢复时间为 100 ps,开关窗口宽度 Δt 为 200 ps,控制脉冲是半峰全宽(FWHM)为 1 ns 的 3 阶超高斯脉冲,由控制端输入,图 1(c)从上到下依次为控制脉冲、TOAD 环中 CW 与 CCW 光的放大函数 $h(T)$ 、仿真输出,很显然,仿真与实验现象一致,都出现了双峰现象。

表1 SOA 仿真参数

Table 1 SOA simulation parameters

Parameter	Value
Length of the active region $L / \mu\text{m}$	150
Saturation energy $E_{\text{sat}} / \text{pJ}$	8
Linewidth enhancement factor α	5.0
Nonlinear gain compression factor ε	0.2
Small-signal gain $g_0 / (10^4 \text{ m}^{-1})$	3.5
Internal linear loss $\alpha_{\text{int}} / \text{m}^{-1}$	2000

研究了控制脉冲能量、开关窗口宽度和SOA载流子寿命等3个参数对双峰现象的影响。在波分复用器1(WDM1)输入的控制脉冲是FWHM为1 ns的3阶超高斯脉冲。SOA的增益恢复时间为100 ps, TOAD开关窗口为200 ps, 改变控制脉冲能量, 观察输出结果如图2(a)所示。峰值功率随脉冲能量增大而增大, 达到5 pJ左右开始饱和, 峰值功率不再增大, 波形开始失真, 且随着控制脉冲能量的继续增大, 双峰间距(双峰最大值之间的时间间隔)逐渐变大, 如图2(b)所示。研究的倍频技术主要由双峰各自的FWHM和峰值间距的改变来实现, 应用时应避免出现波形畸变, 所以不考虑由于控制脉冲能量过大带来的波形畸变。

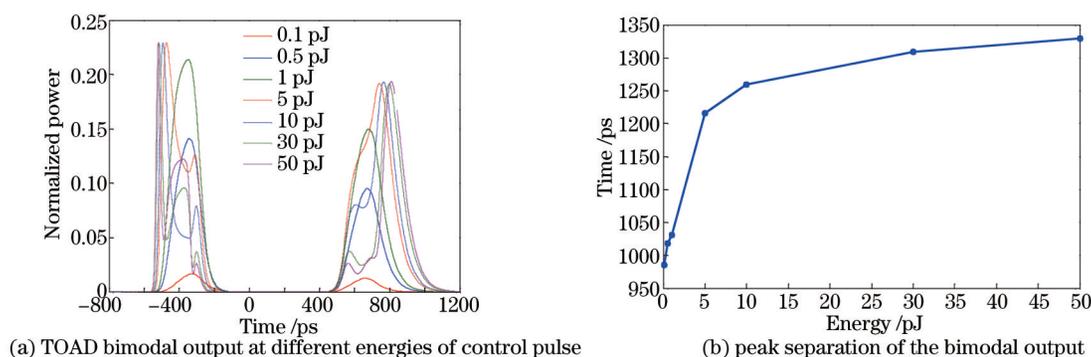


图2 不同控制脉冲能量下TOAD的双峰输出特性

Fig.2 Bimodal output of TOAD at different energies of control pulse

图3是开关窗口宽度变化时TOAD的双峰输出特性, 此时控制脉冲能量为1 pJ, 其他参数不变。由图3可见, 随着开关窗口加宽, 双峰的FWHM也相应增大, 且开关窗口越大时, 双峰的峰值幅度越接近, 双峰间距也小幅度增大, 如图3(b)所示。因此适当选择开关窗口的大小和控制脉冲能量, 可以调整峰值间距和双峰的FWHM, 使之与控制脉冲宽度和倍频的倍数相匹配来实现全光时钟倍频。

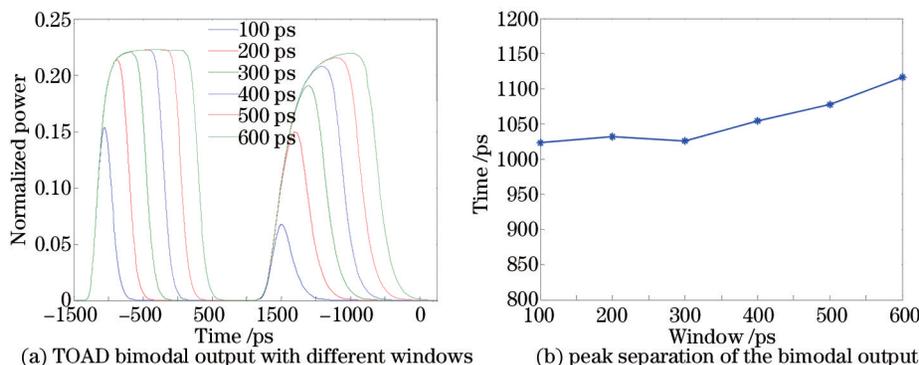


图3 不同开关窗口时TOAD的双峰输出现象特性

Fig.3 Bimodal output of TOAD with different windows

SOA的增益恢复时间决定了TOAD的动态特性, 因此也会影响其双峰输出特性, 图4是不同增益恢复时间对应的TOAD双峰输出特性。可以看出, 当增益恢复时间小于控制脉冲宽度时, 峰值幅度相近, 双峰现象明显; 当增益恢复时间与控制脉冲宽度接近时, 第2个峰逐渐退化, 幅度下降, 双峰现象逐渐消失。随着增益

恢复时间的增加,双峰间距也逐渐变大,如图 4(b)所示。导致这种现象的主要原因是当 SOA 增益恢复时间与控制脉冲宽度接近时,SOA 在控制脉冲的后沿到来时,没有足够多的载流子在高能级上,增益和相位不能完全恢复,从而导致第 2 个峰的退化。所以当 TOAD 控制端输入控制脉冲宽度远大于 SOA 增益恢复时间时,双峰现象较好,当控制脉冲宽度和 SOA 增益恢复时间接近时,双峰现象退化,当控制脉冲宽度很小时只有单一开关脉冲输出。

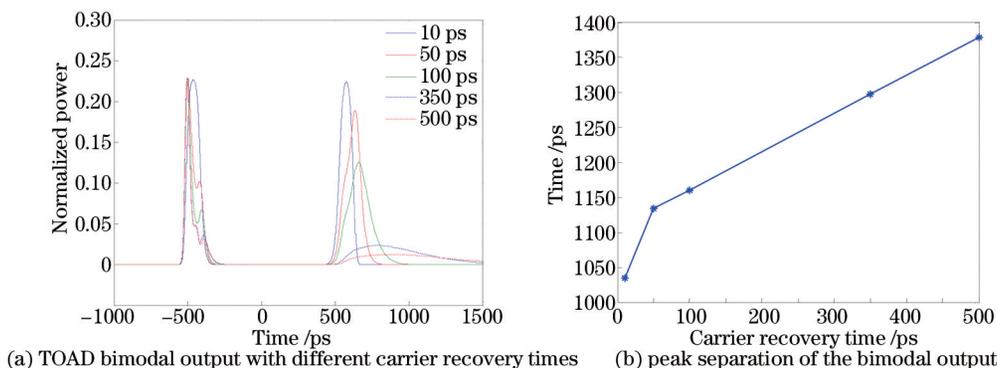


图 4 不同增益恢复时间下 TOAD 的双峰输出特性

Fig.4 Bimodal output of TOAD with different carrier recovery times

3 全光倍频仿真

3.1 二倍频

根据以上分析,为了得到较好的双峰输出,控制脉冲宽度应远大于 SOA 增益恢复时间。在控制端输入 FWHM 为 5 ns 的 3 阶超高斯脉冲,SOA 的载流子恢复时间为 50 ps,开关窗口宽度 $2\Delta t$ 为 2.5 ns,控制脉冲能量为 10 pJ,TOAD 输出如图 5 所示。输出的双峰形状与控制脉冲近似,且宽度为控制脉冲的一半,双峰间距与原控制脉冲宽度相同。由此可见,按照之前的分析,只要选择合适的参数,可以达到良好的二倍频效果。

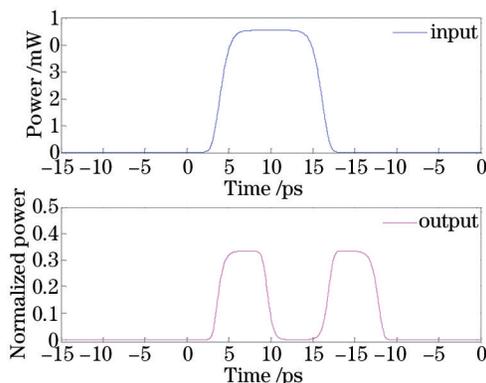


图 5 二倍频仿真结果

Fig.5 Simulation the frequency doubling of the clock

3.2 三倍频

如果控制脉冲 FWHM 为 1 ns,SOA 增益恢复时间为 50 ps,控制脉冲能量为 20 pJ,TOAD 开关窗口为 200 ps,仿真输出如图 6 所示,每个输入脉冲对应的 TOAD 输出的双峰间距为 $4/3$ ns,如图 6(a)所示。

如果将 TOAD 输出分为两路,其中一路产生 $2/3$ ns 的时延,另一路经适当相移,通过耦合器耦合输出,如图 6(c)所示的多倍频系统时延结构图。此时的时钟叠加过程如图 6(b)所示。TOAD 的输出光场为 $E(t)$,耦合器 1 的两路输出光场分别为 E_1 和 E_2 ,则有

$$\begin{pmatrix} E_1 \\ E_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sqrt{2}/2 & j\sqrt{2}/2 \\ j\sqrt{2}/2 & \sqrt{2}/2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E(t) \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E(t)\sqrt{2}/2 \\ jE(t)\sqrt{2}/2 \end{pmatrix}. \quad (1)$$

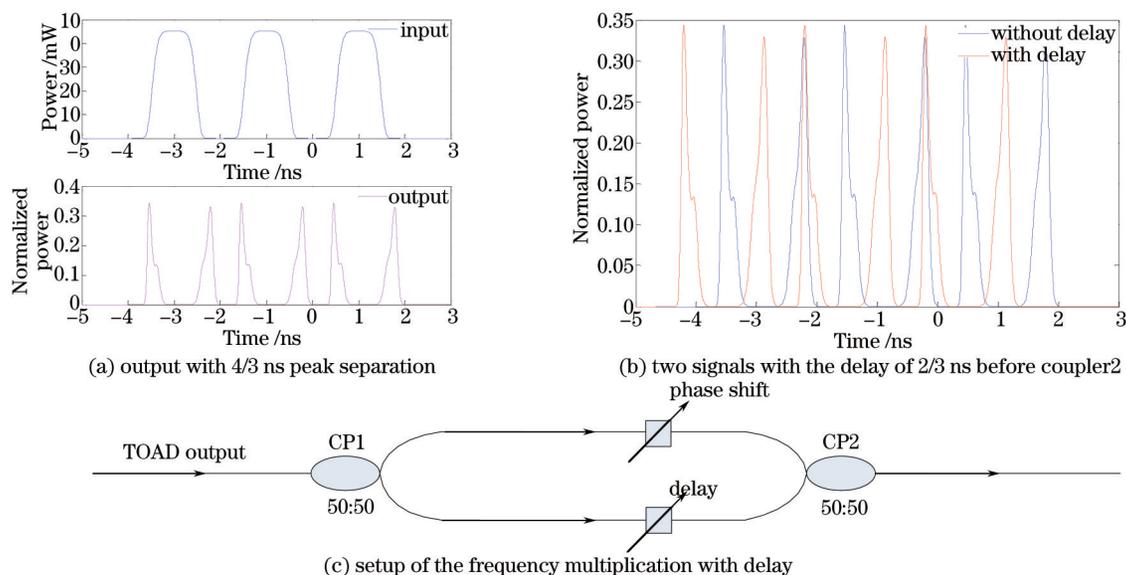


图6 三倍频原理

Fig.6 Principle of the frequency tripling of the clock

经过传输之后,其中一路产生了 φ 的相移,另一个产生了 $2/3$ ns 的延迟,再通过耦合器 2,输出为 E_3 和 E_4 ,则 E_3 和 E_4 分别为

$$\begin{pmatrix} E_3 \\ E_4 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{2}/2 & j\sqrt{2}/2 \\ j\sqrt{2}/2 & \sqrt{2}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1(t)\exp(j\varphi) \\ E_2(t+2/3) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2}E(t)\exp(j\varphi) - \frac{1}{2}E(t+2/3) \\ \frac{j}{2}E(t)\exp(j\varphi) + \frac{j}{2}E(t+2/3) \end{bmatrix}. \quad (2)$$

显然,当耦合器 2 输入两路脉冲重叠时,适当调节相移 φ ,可使输出光功率与二者不重叠时基本一致,可实现功率均衡的三倍频,仿真结果如图 7 所示,图 7(a)为输入输出波形,图 7(b)为输入输出频谱[归一化功率谱密度函数(PSD)随频率的变化],显然频率由 500 MHz 经三倍频到 1.5 GHz。图中显示在 1 GHz 和 2 GHz 的位置,也就是二倍和四倍频的位置有谐波出现,这主要是由于控制脉冲能量较大,波形发生畸变,两路干涉的脉冲形状不完全相同,延迟时间不能完全对准,即(2)式中的 $E(t)$ 和 $E(t+2/3)$ 不完全相同导致了高频分量。

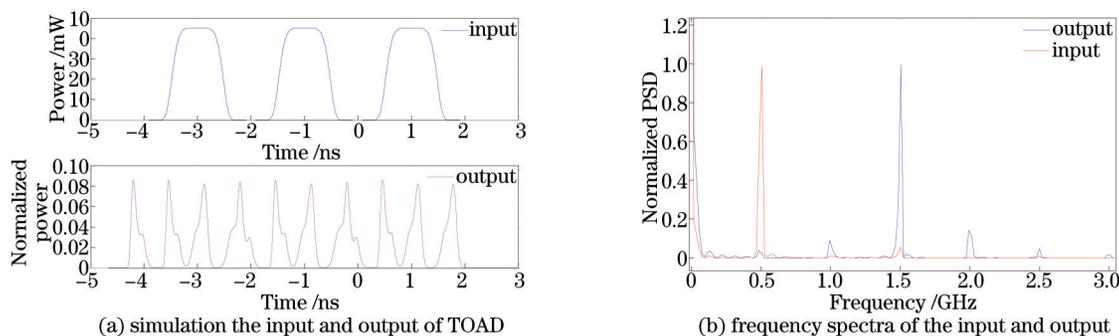


图7 三倍频仿真结果

Fig.7 Simulation the frequency tripling of the clock

3.3 四倍频

如果开关窗口为控制脉冲宽度的 1/4,并且双峰间距与控制脉冲宽度相同,采用控制脉冲的 FWHM 为 1 ns,SOA 增益恢复时间为 50 ps,控制脉冲能量为 0.6 pJ,TOAD 开关窗口为 250 ps,输出的双峰间距为 1 ns。

仍采用图 6(c)的多倍频时延结构,其中时延为 1/2 ns,相移为 0,耦合输出即可实现时钟的四倍频,仿真结果如图 8 所示,频谱显示四倍频非常准确。

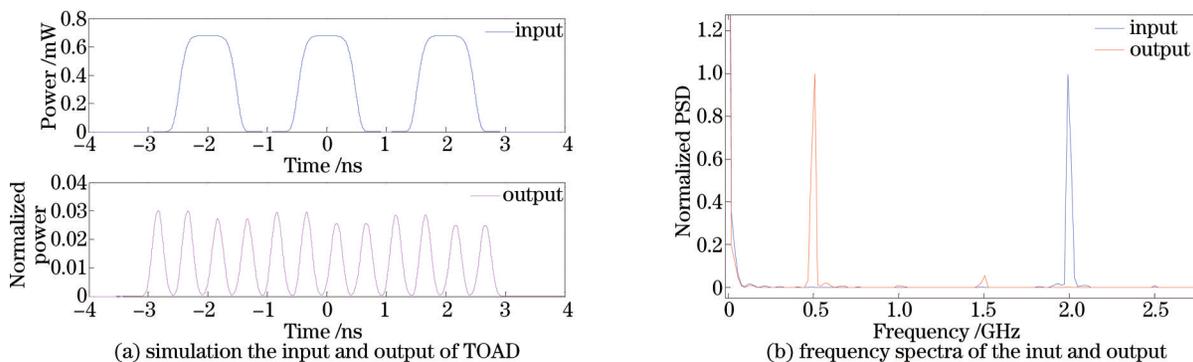


图8 四倍频仿真结果

Fig.8 Simulation the frequency quadrupling of the clock

4 实验

按图1进行实验研究,将信号发生器的时钟调制到激光器 λ_1 ($\lambda_1=1556.1$ nm)的输出,通过控制端注入 TOAD,SOA 偏离中心位置的距离 Δx 可调,SOA 工作电流为 130 mA,激光器 $\lambda_2=1550.6$ nm,输出直流光注入 TOAD 的输入端,TOAD 的输出可用示波器监测。

图9(a)和(b)分别为 200 Mb/s 和 1 Gb/s 的全光时钟二倍频实验结果。200 Mb/s 实验中,TOAD 开关窗口宽度为 2.5 ns,SOA 增益恢复时间为 350 ps,控制脉冲宽度为 5 ns,控制光峰值功率为 1200 μ W,可以看到,双峰幅度接近,波形畸变小,直接将 200 Mb/s 时钟倍频到 400 Mb/s,与仿真的结果一致。1 Gb/s 实验中,TOAD 开关窗口宽度为 400 ps,SOA 增益恢复时间为 350 ps,控制脉冲宽度为 1 ns,控制光峰值功率为 670 μ W。从输出结果可以看出,双峰现象明显,实现了将 1 Gb/s 时钟倍频至 2 Gb/s,但是消光比和脉冲性质均有所劣化。这一结果表明较低速的时钟全光倍频效果更好。

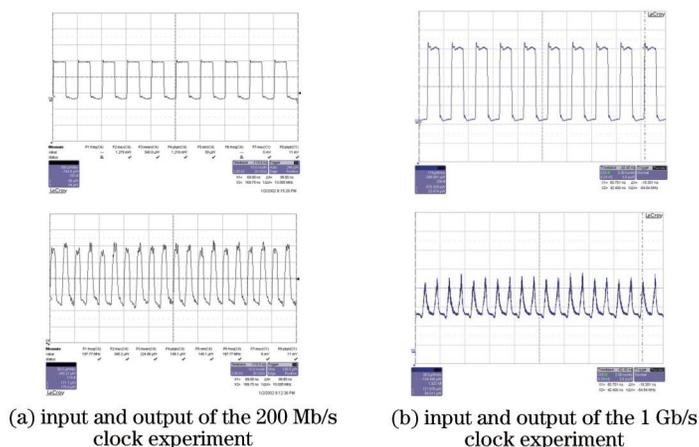


图9 基于TOAD的全光时钟2倍频实验

Fig.9 Experimental results of all-optical frequency doubling of the clock based on TOAD

5 结论

对 TOAD 结构进行了理论研究,分析了时钟脉冲经 TOAD 的双峰输出现象,仿真分析了控制脉冲能量、窗口大小和 SOA 增益恢复时间对输出双峰现象的影响,通过改变这些因素来改变输出双峰间距和 FWHM,结合延时干涉结构可实现全光倍频。理论仿真实现了时钟的二倍频、三倍频和四倍频,实验实现了 200 Mb/s、1 Gb/s 时钟的二倍频,实验与理论一致。

参考文献

1 J P Sokolof. A terahertz optical asymmetric demultiplexer (TOAD)[J]. Photon Technol Lett, 1993, 5(7): 787-790.

- 2 Wen Liangsheng, Wu Jian, Lin Jintong. Analysis of the characteristics of amplified spontaneous emission in TOAD[J]. Chinese J Lasers, 2003, 30(9): 829-834.
温亮生, 伍 剑, 林金桐. 太赫兹光非对称解复用器中自发辐射噪声特性分析[J]. 中国激光, 2003, 30(9): 829-834.
- 3 Wang Zhuoran, Yu Jinlong, Han Jinting, *et al.*. Influences of injection current and the position offset of SOA on switching window of TOAD[J]. Chinese J Lasers, 2004, 31(2): 205-209.
王卓然, 于晋龙, 韩金婷, 等. SOA注入电流及位置偏移量对TOAD开关窗口的影响[J]. 中国激光, 2004, 31(2): 205-209.
- 4 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.
- 5 Gayen D K, Chattopadhyay T, Pal R K, *et al.*. All-optical prefix tree adder with the help of terahertz optical asymmetric demultiplexer[J]. Chin Opt Lett, 2011, 9(6): 062001.
- 6 Maity G K, Chattopadhyay T, Gayen D K, *et al.*. All-optical binary flip-flop with the help of terahertz optical asymmetric demultiplexer[J]. Natural Computing, 2010, 9(4): 903-916.
- 7 Fok M P, Prucnal P R. All-optical XOR gate with optical feedback using highly Ge-doped nonlinear fiber and a terahertz optical asymmetric demultiplexer[J]. Appl Opt, 2011, 50(2): 237-241.
- 8 Wang Yongjun, Zhang Xiaolei, Wu Chongqing, *et al.*. Slot processing based on large dynamic delay range all-optical buffer[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(10): 1005001.
王拥军, 张晓磊, 吴重庆, 等. 基于大动态延迟范围全光缓存器的时隙处理[J]. 中国激光, 2013, 40(10): 1005001.
- 9 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. 基于非线性光纤环镜的40 Gb/s可重构光逻辑门[J]. 光学学报, 2012, 32(5): 0506003.
- 10 Peng Yongjun, Qiu Kun, Ji Siwei. All-optically doubling clock frequency of NRZ signal based on nonlinear fiber-loop mirror[J]. Laser Journal, 2011, 32(5): 27-31.
彭拥军, 邱 昆, 纪四淮. 基于NOLM的NRZ信号全光时钟倍频[J]. 激光杂志, 2011, 32(5): 27-31.
- 11 Sun Zhenchao, Wang Zhi, Liu Lanlan, *et al.*. Key techniques for all optical repetition rate multiplication of pseudorandom bit sequences[J]. Chinese J Lasers, 2014, (41): 0105008.
孙振超, 王 智, 刘岚岚, 等. 全光伪随机码倍速关键技术[J]. 中国激光, 2014, 41(1): 0105008.

栏目编辑: 王晓琰