

# 基于太赫兹光非对称解复用器结构的低开关能量、高线性度全光采样门实验研究\*

江镭 李璞 张建忠 孙媛媛 胡兵 王云才†

(太原理工大学新型传感器与智能控制教育部重点实验室, 太原 030024)

(太原理工大学物理与光电工程学院光电工程研究所, 太原 030024)

(2015年1月7日收到; 2015年3月3日收到修改稿)

利用多量子阱结构的非线性半导体光放大器(SOA)构建的太赫兹光非对称解复用器(TOAD), 实验实现了一个开关能量低至25 fJ, 线性度高达0.99的全光采样门. 详细分析了采样脉冲功率和非对称偏移量分别对采样窗口形状、宽度和幅度的影响, 并研究了不同采样窗口宽度下TOAD的开关能量及线性度的变化规律.

**关键词:** 光采样, 半导体光放大器, 太赫兹光非对称解复用器, 光通信

**PACS:** 42.79.Sz, 42.65.-k

**DOI:** 10.7498/aps.64.154213

## 1 引言

光采样是现代光信息处理和高速光信号测量的关键技术. 随着时分复用技术<sup>[1]</sup>的迅速发展, 现代通信系统的单波长传输速率正朝着100 Gbit/s发展. 如此高速率下, 传统的电采样技术因电子瓶颈的限制已无法满足需求, 全光采样技术理所当然地成为了首选的监测手段.

全光采样门作为全光采样系统的核心基本单元, 低开关能量和高线性度是关键的技术指标. 常见的全光采样门都是利用非线性介质中的非线性效应来实现的. 非线性晶体是全光采样门研究初期常用的非线性介质. 1968年, Duguay等首次利用KDP晶体的和频效应实现了对亚纳秒光脉冲的测量, 实验中所用采样脉冲峰值功率高达200 MW, 能量高达80 mJ, 转换效率仅为5%<sup>[2]</sup>. 之后, AANP等<sup>[3]</sup>, PPLN<sup>[4]</sup>晶体逐渐代替KDP晶体作为非线性介质, 由于其转换效率相对较高, 在一定程度上降低了对采样脉冲功率的要求, 但峰

值功率仍高达数百W、能量达数百pJ. 1991年, 随着Andrekson成功利用14 km的高非线性光纤中的四波混频效应实现对毫秒级信号的全光采样<sup>[5]</sup>, 光纤开始作为崭新的非线性介质引起人们的广泛关注. 基于高非线性光纤(HNLF)的四波混频(FWM)<sup>[6,7]</sup>、光参量放大(OPA)<sup>[8,9]</sup>和交叉相位调制(XPM)等<sup>[10,11]</sup>效应构建全光采样门的研究工作开始不断涌现. 2003年, Siahlo等利用基于HNLF的XPM效应构建的非线性光学环镜实现了80 Gbit/s的时分复用信号经80 km单模光纤传输后的解复用, 实验中仅用了50 m的光子晶体光纤<sup>[12]</sup>. 但由于光纤的转换效率低, 此类采样技术所需的采样脉冲峰值功率仍高至数W, 能量为数pJ. 与此同时, 半导体光放大器(SOA)<sup>[13]</sup>因其非线性系数大、集成度高等优点, 逐渐成为实现全光信号处理的又一主要器件. 利用SOA的四波混频(FWM)<sup>[14,15]</sup>、交叉增益调制(XGM)<sup>[16,17]</sup>、交叉相位调制(XPM)<sup>[18,19]</sup>和非线性偏振旋转(NPR)等<sup>[20,21]</sup>非线性效应实现全光开关、波长转换和解复用的研究工作早已出现. 基于SOA的全光采样

\* 国家自然科学基金科学仪器基础研究专款(批准号: 61227016)和国家自然科学基金青年科学基金(批准号: 61205142, 51404165)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: [wangyc@tyut.edu.cn](mailto:wangyc@tyut.edu.cn)

研究近年来也开始引起人们的广泛关注<sup>[22-24]</sup>. 其中, 基于太赫兹光非对称解复用器 (TOAD)<sup>[25,26]</sup> 的全光采样门具有开关能量低、结构紧凑、易于集成且稳定性高等优点, 因此具有很好的应用前景. Deng 等<sup>[27]</sup> 利用 TOAD 全光采样门实现了对亚皮焦单发光波形的采样; 紧接着, Bogoni 等利用相同的结构实现了对 20 ps 脉冲的光采样<sup>[28]</sup>. 然而在这些报道中, 并没有分析相关参数对 TOAD 采样门性能的影响, 且所需采样脉冲能量较高为数百 fJ.

本文利用多量子阱结构的非线性 SOA 实验实现了一个低开关能量、高线性度的 TOAD 全光采样门, 详细分析了采样脉冲功率及非对称偏移量分别对采样窗口形状、宽度和幅度的影响, 并研究了不同采样窗口宽度下 TOAD 的开关能量及线性度的变化规律. 研究表明, 本采样门所需开关能量可低至 25 fJ, 采样线性度高达 0.99.

## 2 TOAD 工作原理及实验装置图

在普通光纤环境内非对称地放置一个非线性 SOA 即构成 TOAD, 如图 1 所示, 其基本工作原理可简述如下.

超快光时钟 (UOC) 产生的采样脉冲由波分复用器 (WDM) 耦合进 TOAD, 分布式反馈半导体激光器 (DFB-LD) 产生的连续信号光经 50 : 50 光耦

合器进入环内, 分为沿顺时针方向 (CW) 和逆时针方向 (CCW) 传播的两路信号光, 绕环一周后回到耦合器干涉输出. 由于 SOA 偏离环中心点位置  $\Delta x$ , 两路信号光将在不同时刻经过 SOA, 彼此之间时延差为  $\Delta t = 2\Delta x/v_g$ ,  $v_g$  为信号光在光纤环内的传输速度.

假定输入信号光功率为  $P_{in}$ , 则干涉输出信号  $P_{out}$  满足以下关系式:

$$P_{out} = \frac{1}{4}P_{in}[G_{cw} + G_{ccw} - 2\sqrt{G_{cw}G_{ccw}} \times \cos(\phi_{cw} - \phi_{ccw})], \quad (1)$$

式中,  $G_{cw}$ ,  $G_{ccw}$  和  $\phi_{cw}$ ,  $\phi_{ccw}$  分别为 CW, CCW 信号光经过 SOA 时经历的增益和相移. 当无采样脉冲时, SOA 对两路信号光的作用相同, 即  $G_{cw}$  与  $G_{ccw}$  相同,  $\phi_{cw}$  与  $\phi_{ccw}$  相等, 在耦合器干涉时无信号光输出. 当有采样脉冲时, 使 SOA 达到饱和, 载流子密度发生改变, 此时 CW 和 CCW 两路信号光将经历不同的增益和相位调制, 彼此之间存在相位差, 在耦合器干涉时有信号光输出. 于是 TOAD 相当于打开了一个宽度约为  $\Delta t$  的时间窗口, 该窗口随采样脉冲的到来而周期性地出现. 改变采样脉冲功率和 SOA 在环里的非对称偏移量可以改变 SOA 的动态响应特性, 从而控制 TOAD 输出特性.

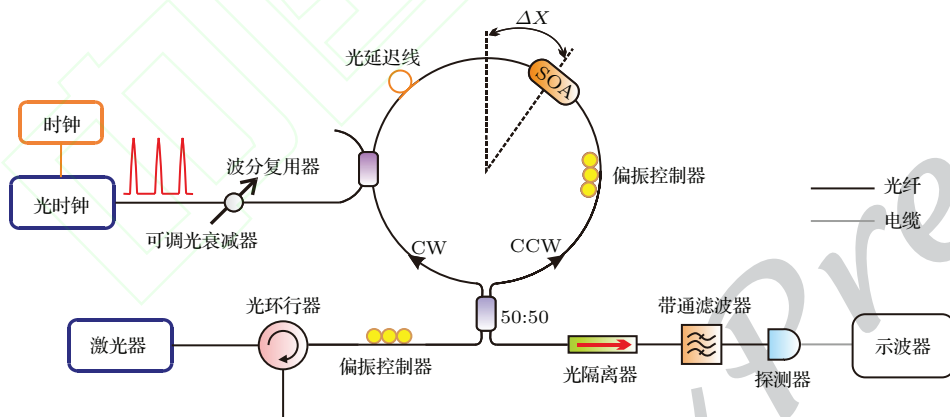


图 1 (网刊彩色) TOAD 光采样门实验装置图 (SOA, 半导体光放大器; CW, 顺时针方向; CCW, 逆时针方向)

Fig. 1. (color online) Experimental setup of optical sampler based on TOAD, SOA: Semiconductor Optical Amplifier, CW: clockwise propagating, CCW: counterclockwise propagating.

## 3 实验结果

实验中, UOC(Pritel, UOC-05-14 G-E) 产生的高斯型采样脉冲中心波长为 1551.258 nm, 重

复频率为 5 GHz, 半高全宽 (FWHM) 为 2.2 ps, 而作为探测信号的连续光由 DFB-LD (WTD, LDM5S752) 产生, 其中心波长为 1553.658 nm. TOAD 环中的半导体光放大器采用多量子阱结构的非线性 SOA (Kamelian, SOA-NL-L1-C-FA), 其

工作电流为 300 mA, 相应的小信号增益为 26 dB, 增益恢复时间为 25 ps. 通过调节可调光衰减器 (VOA) 改变采样脉冲进入 SOA 前平均功率从  $-16$  dBm 变化到  $-4$  dBm; 与此同时, 探测信号经 50 : 50 保偏光耦合器进入环后, CW 与 CCW 信号光进入 SOA 前的平均功率分别为  $55.4 \mu\text{W}$  和  $57.2 \mu\text{W}$ . 环内的可调光延迟线 (TODL, General Photonics, MDL-002) 用来改变 SOA 在光纤环中的非对称偏移量, 以实现不同宽度的采样窗口. 为了消除 SOA 的残余偏振依赖, 可以通过偏振控制器 (PC) 调节信号光和环路中的偏振态. TOAD 最终输出经带通滤波器 (BPF) 滤除采样脉冲信号和 ASE 噪声后, 再由光电探测器 (PD, U<sup>2</sup>T, XPDV2120RA, 带宽 44 GHz) 光电转换后接入数字示波器 (OSC, Lecroy, LabMaster10-36Zi, 带宽 36 GHz) 进行观察. 输出端的光隔离器 (ISO) 是为了防止输出信号反射回 TOAD 造成干扰.

### 3.1 采样脉冲功率对采样窗口的影响

由 (1) 式可知, 为了使 TOAD 输出达到最大, 必须使 CW 与 CCW 信号光之间的相位差达到  $\pi$ , 然而该相位差主要由采样脉冲功率控制. 为此, 我们首先分析了采样脉冲功率对 TOAD 采样窗口的影响. 图 2 (a) 所示为开关窗口约为 30 ps 时, 采样脉冲平均功率从  $-16$  dBm 到  $-4$  dBm 以 0.5 dB 为步进变化时, 采样窗口随之变化情况. 图中同时显示了两个采样窗口, 时间间隔为 200 ps, 对应于采样脉冲 5 GHz 的重复频率. 从图中可以看出, 采样脉冲功率对窗口幅度的影响非常显著且存在一个最佳的采样脉冲功率, 而对窗口的形状基本无影响. 窗口后面的振荡结构是光电探测器对脉冲响应时的振铃现象, 脉冲功率越大, 振铃现象越严重, 图 2 (b) 也说明了这一点. 为了更方便观察采样脉冲功率对采样窗口宽度的影响, 图 2 (b) 给出了不同采样脉冲功率下的采样窗口波形. 从图中可以明显看出, 窗口宽度基本保持不变, 不受采样脉冲功率的影响, 这是因为它取决于 SOA 在环里的非对称偏移量. 图 2 (c) 给出了采样窗口归一化幅度随采样脉冲功率的变化曲线, 图中最高点对应的平均功率即为实现 CW 与 CCW 信号光相位差为  $\pi$  时的最佳采样脉冲功率, 此值约为  $-9$  dBm, 计算得出单个采样脉冲能量约为 25 fJ.

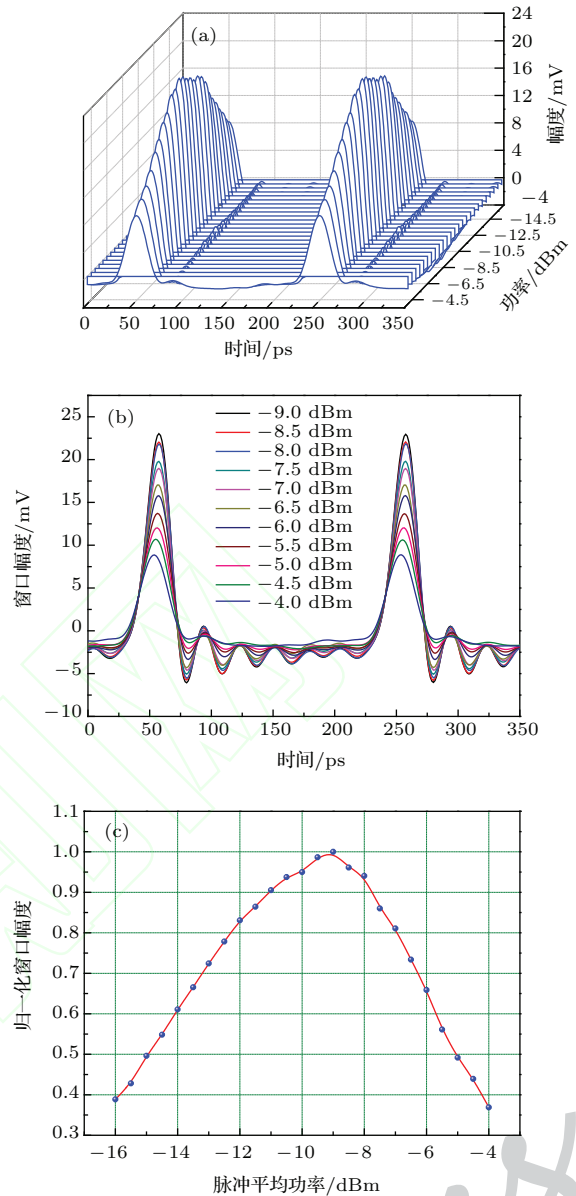


图 2 (网刊彩色) 采样脉冲功率对采样窗口的影响 (a) 采样脉冲功率对窗口形状的影响; (b) 采样脉冲功率对窗口宽度的影响; (c) 采样脉冲功率对窗口幅度的影响  
Fig. 2. (color online) The effect of the power of sampling pulses on the sampling window: (a) the effect on the shape of the sampling window; (b) the effect on the width of the sampling window; (c) the effect on the normalized amplitude of the sampling window.

### 3.2 非对称偏移量对采样窗口的影响

非对称偏移量  $t$ , 是影响 TOAD 采样窗口特性的另一个重要参数. 它由 SOA 偏离环中心点位置  $\Delta x$  决定,  $t = \Delta x/v_g$ . 实验中, 通过 TODL 来改变  $\Delta x$  从而改变非对称偏移量  $t$ , 以实现不同宽度的采样窗口. 图 3 (a) 所示为在最佳采样脉冲功率下, 非对称偏移量从 1 ps 到 20 ps 以 1 ps 为步进变化时,



的目标. 具体地讲, TOAD 开关能量为窗口宽度一定, CW 与 CCW 信号光之间产生  $\pi$  的相位差, 即输出窗口幅度达到最大时所需的采样脉冲能量. 图 4(a) 所示为不同采样窗口宽度下, 窗口幅度随采样脉冲能量的变化情况. 从图中可以看出, 每个采样窗口宽度下, 均有一个最佳采样脉冲能量, 而且不同的采样窗口所对应的最佳采样脉冲能量基本相同. 图 4(b) 详细给出了不同采样窗口宽度下的 TOAD 开关能量, 可以看出开关能量基本不受采样窗口宽度的影响, 约保持在 25 fJ. 据我们所知, 该开关能量是迄今为止实验上获得的最低的 TOAD 开关能量.

### 3.4 TOAD 线性度

线性度是评价采样门的重要指标之一, 线性度的好坏直接影响采样系统性能, 它直接反映了采样后信号失真情况. 定量地讲, TOAD 线性度为 TOAD 输出信号幅度与输入信号功率的线性关系程度. 完全理想情况下, 采样门线性度为 1, 但在实际中或多或少地存在非线性失真. 图 5 给出了不同采样窗口下, TOAD 输出信号幅度与输入信号光功率的变化关系, 图 5(a), (b), (c) 所示采样窗口宽度分别为 30 ps, 25 ps, 20 ps. 从图中可以看出, 在不同的采样窗口下, TOAD 均具有非常好的线性度, 达到 0.99 以上. 另一方面, 不同宽度的采样窗口能探测的最小信号光功率有所不同, 反映出采样窗口越大, TOAD 灵敏度越高, 相应的动态范围越大.

## 4 讨论

在上述研究非对称偏移量对采样窗口宽度的影响的实验结果中, 由于受示波器和探测器带宽的限制, 非对称偏移量小于 9 ps 时, 所示波形未能反映采样窗口的真实宽度. 为此, 我们做了相关的理论仿真, 仿真中 SOA 采用了分段模型<sup>[29]</sup>. 计算中, 采样脉冲为高斯脉冲, 脉冲周期为 200 ps, 半高全宽为 2.2 ps, SOA 增益恢复时间为 25 ps. 图 6 给出了仿真结果, 所示为不同非对称偏移量(小于 9 ps)下的采样窗口特征. 从图中可以看出, 非对称偏移量决定着采样窗口的宽度, 但不同宽度的采样窗口具有近似相同的上升沿, 这与实验结果图 3(b) 所示一致. 需要特别指出的是, 当非对称偏移量为 1 ps 时, 采样窗口输出功率非常低. 实验中, 受限于探测器和示波器的灵敏度, 未能观察到有效窗口.

图 5 (网刊彩色) 不同窗口宽度下, 输出信号幅度与输入信号光功率的变化关系. 窗口宽度分别为 (a) 30 ps; (b) 25 ps; (c) 20 ps

Fig. 5. (color online) Linearity of TOAD: dependence of output power of TOAD on input signal power under different window width. (a) 30 ps; (b) 25 ps; (c) 20 ps.

图 6 (网刊彩色)(数值仿真) 不同非对称偏移量(9 ps) 下的采样窗口

Fig. 6. (color online) (numerical simulation) The sampling windows with different asymmetric offset (below 9 ps).



## 5 结 论

本文利用多量子阱结构的非线性 SOA, 实验获得了一个开关能量低至 25 fJ, 线性度高达 0.99 的 TOAD 全光采样门. 实验分析了采样脉冲功率和非对称偏移量分别对采样窗口形状、宽度和幅度的影响. 结果表明, 采样脉冲功率对采样窗口形状和宽度基本没有影响, 对窗口幅度影响显著, 且存在一个最佳的采样脉冲功率, 此最佳功率决定着 TOAD 的开关能量. 非对称偏移量决定着采样窗口的宽度, 而且对窗口形状和幅度均有较大影响. 不同宽度的采样窗口, 具有近似相同的上升沿. 窗口幅度会随非对称偏移量的增加, 先急剧增大后逐渐平缓, 最终趋于稳定. 此外, 实验研究了不同采样窗口宽度下, TOAD 的开关能量及线性度. 结果表明, 在不同窗口宽度下, TOAD 开关能量基本保持不变, 并具有非常好的线性度. 不同的窗口宽度, TOAD 灵敏度有所不同, 采样窗口越大, TOAD 灵敏度越高, 相应的动态范围越大.

## 参考文献

- [1] Weber H G, Ludwig R, Ferber S, Schmidt-Langhorst C, Kroh M, Marembert V, Boerner C, Schubert C 2006 *J. Lightwave Technol.* **24** 4616
- [2] Duguay M A, Hansen J W 1968 *Appl. Phys. Lett.* **13** 178
- [3] Takara H, Kawanishi S, Yokoo A, Tomaru S, Kitoh T, Saruwatari M 1996 *Electron. Lett.* **32** 2256
- [4] Nogiwa S, Kawaguchi Y, Ohta H, Endo Y 2000 *Electron. Lett.* **36** 1727
- [5] Andrekson P A 1991 *Electron. Lett.* **27** 1440
- [6] Westlund M, Andrekson P A, Sunnerud H, Hansryd J, Li J 2005 *J. Lightwave Technol.* **23** 2012
- [7] Liang J Q, Wang J F, Li P, Wang Y C 2013 *Chin. J. Lasers* **40** 402009 (in Chinese) [梁俊强, 王娟芬, 李璞, 王云才 2013 中国激光 **40** 402009]
- [8] Li J, Hansryd J, Hedekvist P O, Andrekson P A, Knudsen S N 2001 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **13** 987
- [9] Wang W R, Yu J L, Luo J, Han B C, Wu B, Guo J Z, Wang J, Yang E Z 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 104220 (in Chinese) [王文睿, 于晋龙, 罗俊, 韩丙辰, 吴波, 郭精忠, 王菊, 杨恩泽 2011 物理学报 **60** 104220]
- [10] Li J, Westlund M, Sunnerud H, Olsson B, Karlsson M, Andrekson P A 2004 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **16** 566
- [11] Li P, Wang Y C, Zhang J Z 2010 *Opt. Express* **18** 20360
- [12] Siahlo A I, Oxenløwe L K, Berg K S, Clausen A T, Andersen P A, Peucheret C, Tersigni A, Jeppesen P, Hansen K P, Folkenberg J R 2003 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **15** 1147
- [13] Stubkjaer K E 2000 *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **6** 1428
- [14] Kawanishi S, Morioka T, Kamatani O, Takara H, Jacob J M, Saruwatari M 1994 *Electron. Lett.* **30** 981
- [15] Diez S, Schmidt C, Ludwig R, Weber H G, Obermann K, Kindt S, Koltchanov I, Petermann K 1997 *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **3** 1131
- [16] Ellis A D, Kelly A E, Nettet D, Pitcher D, Moodie D G, Kashyap R 1998 *Electron. Lett.* **34** 1958
- [17] Zhang X L, Huang D X, Sun J Q, Liu D M 2001 *Chin. Phys. B* **10** 124
- [18] Nakamura S, Ueno Y, Tajima K, Sasaki J, Sugimoto T, Kato T, Shimoda T, Itoh M, Hatakeyama H, Tamanuki T, Sasaki T 2000 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **12** 425
- [19] Wang Y, Zhang X L, Huang D X 2004 *Chin. Phys. B* **13** 882
- [20] Liu Y, Hill M T, Tangdionga E, Waardt H, Calabretta N, Khoe G D, Dorren H J S 2003 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **15** 90
- [21] Feng C F, Wu J, Zhang J Y, Xu K, Lin J T 2008 *Chin. Phys. B* **17** 1000
- [22] Diez S, Schmidt C, Hoffmann D, Bornholdt C, Sartorius B, Weber H G, Jiang L, Krotkus A 1998 *Appl. Phys. Lett.* **73** 3821
- [23] Liu M T, Yang A Y, Sun Y N 2008 *Acta Opt. Sin.* **28** 151 (in Chinese) [刘茂桐, 杨爱英, 孙雨南 2008 光学学报 **28** 151]
- [24] Zhang S J, Zhang Y L, Liu S, Li H P, Liu Y 2012 *Photonics Asia International Society for Optics and Photonics* Beijing, China, November 5-7, 2012 p85520M
- [25] Sokoloff J P, Prucnal P R, Glesk I, Kane M 1993 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **5** 787
- [26] Wang H, Wu J, Lin J 2005 *Opt. Commun.* **256** 83
- [27] Deng K L, Runser R J, Glesk I, Prucnal P R 1998 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **10** 397
- [28] Bogoni A, Ponzini F, Scaffardi M, Ghelfi P, Potì L 2004 *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **10** 186
- [29] Swift G, Ghassemlooy Z, Ray A K, Travis J R 1998 *IEE Proc. Circuits Device Syst.* **145** 61

# Experimental study on a low switching energy and highlinearity all-optical sampler based on terahertz optical asymmetric demultiplexer\*

Jiang Lei Li Pu Zhang Jian-Zhong Sun Yuan-Yuan Hu Bing Wang Yun-Cai†

(Key Laboratory of Advanced Transducers and Intelligent Control System, Ministry of Education, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

(Institute of Optoelectronic Engineering, College of Physics & Optoelectronics, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

( Received 7 January 2015; revised manuscript received 3 March 2015 )

## Abstract

We demonstrate experimentally a low switching energy and highlinearity all-optical sampler based on terahertz optical asymmetric demultiplexer (TOAD) composed of a nonlinear semiconductor optical amplifier (SOA) with a multiple quantum well structure. Effects of the sampling pulse power and asymmetric offset of SOA on the shape, width and amplitude of sampling windows are analyzed in detail respectively. It is found that the sampling pulse power has no effect on both the shape and the width of sampling windows, but has a significant effect on the window amplitude. Meanwhile there exists an optimal power which maximizes the sampled output and determines the switching energy of TOAD. The asymmetric offset of SOA from the center position in the loop determines the width of sampling windows and has great influences on both the shape and the amplitude of the sampling window. The sampling windows with different widths have approximately the same rise edge due to the fast response of SOA for the sampling pulse. However, the normalized amplitude of sampling windows firstly increases sharply with the increase of the asymmetry, then gradually flattens out, and tends to be stable in the end. In addition, the switching energy and linearity of TOAD are studied. The switching energy is as low as 25 fJ, and the linearity is as high as 0.99. Moreover, at different window widths, the switching energy of TOAD remains the same and the sampling windows have a very good linearity. However, the sensitivity of a TOAD sampler with different width is different: the wider the sampling window, the higher the sensitivity and the larger the corresponding dynamic range.

**Keywords:** optical sampling, semiconductor optical amplifier, terahertz optical asymmetric demultiplexer, optical communications

**PACS:** 42.79.Sz, 42.65.-k

**DOI:** 10.7498/aps.64.154213

\* Project supported by the Special Fund For Basic Research on Scientific Instruments of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61227016), and the Young Scientists Fund of the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61205142, 51404165).

† Corresponding author. E-mail: wangyc@tyut.edu.cn