

文章编号:1004-9037(2014)06-0917-05

# 基于半导体光放大器偏振旋转的全光脉冲采样

张尚剑 王 恒 邹新海 张雅丽 刘 爽 李和平 刘 永

(电子科技大学光电信息学院,电子薄膜与集成器件国家重点实验室,成都,610054)

**摘要:**提出了一种利用单个半导体光放大器实现超高速全光采样的方法。该方法利用半导体光放大器的非线性偏振旋转效应,经过半导体光放大器后模拟光信号的波形被复制到采样脉冲光信号的包络上,实现对模拟光信号的高速全光脉冲采样。实验演示中,分别验证了对2.5 GHz的模拟光信号的40 GSa/s的全光脉冲采样。实验结果测试分析表明,在工作功率为5 mW时,本方法的基波转换效率为1.35%、总谐波失真达到2.01%。在此基础上,进一步提高采样工作速率,验证了对10 GHz模拟信号的160 GSa/s的全光采样。采样方法具有只需单个有源器件且操作光功率小的特点。

**关键词:**半导体光放大器;非线性偏振旋转;全光采样

**中图分类号:** TN929.1 **文献标志码:** A

## High-Speed All-optical Pulsed Sampling by Using Nonlinear Polarization Rotation of Semiconductor Optical Amplifiers

Zhang Shangjian, Wang Heng, Zou Xinhai, Zhang Yali, Liu Shuang, Li Heping, Liu Yong

(State Key Laboratory of Electronic Thin Films and Integrated Devices, School

of Optoelectronic Information, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, 610054, China)

**Abstract:** An all-optical sampling scheme using a single semiconductor optical amplifier is proposed for analog signal processing. The analog optical signal is sampled by the probe pulse train through the nonlinear polarization rotation arising in semiconductor optical amplifier. Conversion efficiency and total harmonic distortion are presented to evaluate sampling linearity. In the experiment, 40 GSa/s all-optical sampling for 2.5 GHz analog optical signal is demonstrated with commercially available fiber-pigtailed components. The results show that the fundamental conversion efficiency and the total harmonic distortion are 1.35% and 2.01% at the operating power of 5 mW, respectively. Further, 160 GSa/s all-optical pulsed sampling for 10 GHz analog optical signal is also demonstrated. The proposed all-optical sampling requires only one semiconductor optical amplifier and has low power consumption. It is simple and potential for photonic integration.

**Key words:** semiconductor optical amplifier; nonlinear polarization rotation; all-optical sampling

## 引 言

全光采样在全光模数转换和高速波形测量中

具有重要的应用,同样受到人们广泛关注<sup>[1-2]</sup>。传统的基于光纤非线性的全光采样方法,例如自相位调制<sup>[3]</sup>、交叉相位调制<sup>[4]</sup>、四波混频<sup>[5]</sup>以及拉曼孤子自移频<sup>[6]</sup>等,这些方法具有超高的采样速率,但

**基金项目:**国家重点基础研究发展计划(“九七三”计划)(2012CB315701)资助项目;信息光子学与光通信国家重点实验室开放基金资助项目;国家自然科学基金(61377037,61090393,61307031)资助项目;四川省青年基金(2013JQ0026)资助项目;教育部新世纪人才支持计划(NCET-11-0069)资助项目。

**收稿日期:**2014-04-17;**修订日期:**2014-06-22

需要的驱动功率很大(大约几瓦)<sup>[3-6]</sup>。

近年来,基于半导体材料的光信号处理技术,由于其具有功率损耗低、非线性系数高和适合大规模的集成的优点<sup>[7-8]</sup>,得到了人们的广泛关注。由半导体光放大器(Semiconductor optical amplifier, SOA)的双折射引起的非线性偏振旋转效应(Nonlinear polarization rotation, NPR)在波长转换、光开关、光缓存、光逻辑门、光再生以及数据格式转换等全光数字信号处理方面的应用广泛<sup>[9-17]</sup>。SOA 的 NPR 效应已成功用于波长转换、全光交换和全光再生<sup>[13-17]</sup>。本文提出了一种基于 SOA-NPR 效应的全光脉冲采样方法。与传统的全光数字信号处理不同,在所用方法中,模拟信号光作为泵浦光,在 SOA 中利用 NPR 效应对采样脉冲进行调制,在实验中,实现了 2.5 GHz 的模拟光信号的 40 GSa/s 全光脉冲采样,以及 10 GHz 模拟信号的 160 GSa/s 的全光脉冲采样,评价了采样线性度,验证了全光采样方法的可行性。

## 1 工作原理

如图 1 所示,全光采样系统由一个 SOA,两个偏振控制器(Polarization controllers, PCs),一个光带通滤波器(Band-pass filter, BPF),以及一个偏振分束器(Polarization beam splitter, PBS)构成。待采样的模拟信号光作为泵浦光注入到 SOA 中,同时注入一个脉冲信号作为探测光。可以认为探测光的 TE 和 TM 模在 SOA 中各自独立传输,它们之间通过增益饱和相互作用<sup>[13-14]</sup>。作为泵浦光的模拟信号,在不考虑超快(亚皮秒量级)带内弛

豫过程时,可以利用相对简单的偏振耦合速率方程来求解,表达式为<sup>[13]</sup>

$$\frac{dn_x}{dt} = \frac{f}{1+f} \frac{I}{q} - \frac{n_x}{\tau_e} - \Gamma^{\text{TE}} g^{\text{TE}} \frac{G^{\text{TE}} - 1}{\Gamma^{\text{TE}} g^{\text{TE}} - \alpha_{\text{int}}^{\text{TE}}} S^{\text{TE}} \quad (1(a))$$

$$\frac{dn_y}{dt} = \frac{1}{1+f} \frac{I}{q} - \frac{n_y}{\tau_e} - \Gamma^{\text{TM}} g^{\text{TM}} \frac{G^{\text{TM}} - 1}{\Gamma^{\text{TM}} g^{\text{TM}} - \alpha_{\text{int}}^{\text{TM}}} S^{\text{TM}} \quad (1(b))$$

式中: $I$  为 SOA 偏置电流, $q$  为电子电量, $\tau_e$  为电子-空穴复合时间, $h$  为普朗克常数, $S^{\text{TE}}$  和  $S^{\text{TM}}$  分别为 TE 和 TM 模场上的光子数密度。当 SOA 被高强度的泵浦光饱和时,TE 模的增益饱和和折射系数的改变,使与 TM 模不同,可以分别表示为

$$G^i = \exp[(\Gamma^i g^i - \alpha_{\text{int}}^i) L] \quad i = \text{TE or TM} \quad (2(a))$$

$$\Delta\varphi = \varphi^{\text{TE}} - \varphi^{\text{TM}} = (\alpha^{\text{TE}} \Gamma^{\text{TE}} g^{\text{TE}} - \alpha^{\text{TM}} \Gamma^{\text{TM}} g^{\text{TM}}) L/2 \quad (2(b))$$

式中:上标  $i$  对应于 TE 模和 TM 模, $\Gamma$  为限制因子, $g$  为在 SOA 传输时作为常数的单位增益, $\alpha$  为相位调制系数, $\alpha_{\text{int}}$  为单位模式损耗。泵浦光使探测光的 TE 和 TM 模有不同的增益和相位改变,从而形成附加的双折射。经过 SOA 后,探测光被 BPF 滤波,然后进入 PBS。在 PBS 中两个模式合并在一起,合成光强为

$$P_{\text{bout}} = P_b^{\text{TE}} + P_b^{\text{TM}} + 2\sqrt{P_b^{\text{TE}} P_b^{\text{TM}}} \cos(\Delta\varphi + \varphi_{\text{pc}}) \quad (3(a))$$

$$P_b^{\text{TE}} = P_{\text{bin}} \cos^2 \theta \cos^2 \beta \cdot G^{\text{TE}} \quad (3(b))$$

$$P_b^{\text{TM}} = P_{\text{bin}} \sin^2 \theta \sin^2 \beta \cdot G^{\text{TM}} \quad (3(c))$$

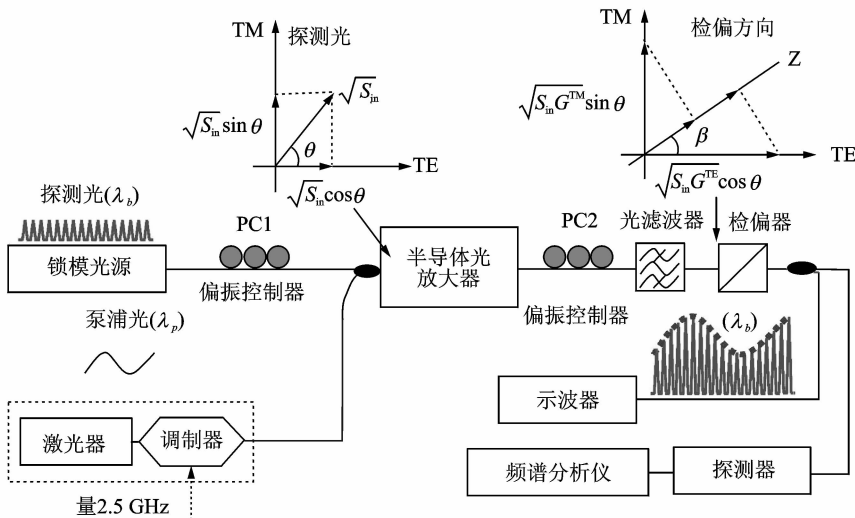


图 1 基于非线性偏振旋转的全光脉冲采样原理图

Fig. 1 Schematic setup of all-optical sampling based on nonlinear polarization rotation

式中:  $P_{\text{bin}}$  和  $P_{\text{bout}}$  分别表示入射探测光和出射探测光的强度。 $\theta$  为输入探测光相对于 SOA 取向层的偏振角, 能够通过偏振控制器 (Polarization controller, PC) 调节。其中, PC1 为第一个偏振控制器, PC2 为第 2 偏振控制器,  $\Phi_{\text{pc}}$  是第二个偏振控制器引起的相位偏置,  $\beta$  为 PBS 与 SOA 取向层的夹角。

在全光脉冲采样方法中, 系统被设置为在没有模拟泵浦信号时, 探测脉冲通过 PBS 后有最小输出。当随着泵浦信号的增加, 在 SOA 中附加的双折射导致探测脉冲信号的 TE 模和 TM 模的相位不同, 并引起探测光的偏振旋转。因此会有更多探测信号通过 PBS 的输出, 达到模拟泵浦信号对探测脉冲光的调制, 实现全光脉冲采样。

## 2 线性度评价方法

全光采样旨在产生一个与输入泵浦信号的波形相似的脉冲包络信号, 尽量减小波形的失真。在传统的波形失真的评价中, 使用单频信号作为泵浦信号, 基波效率与谐波失真分别定义为<sup>[18]</sup>

$$e_{11} = b_1/a_1 \quad (4)$$

$$d_{k1} = b_k/b_1 \quad k=2,3,\dots \quad (5)$$

式中: 系数  $a_1$  为输入的泵浦信号,  $b_k$  为输出探测信号的第  $k$  阶谐波。为了描述整体波形的非线性失真, 总谐波失真 (Total harmonic distortion, THD) 被写为<sup>[12]</sup>

$$\text{THD} = \sqrt{\sum_{n=2} b_n^2} / |e_{11} a_1| \quad (6)$$

对于式(4~6), 转换效率越高、谐波失真越小, 采样性能越好。

在一般情况下, 输入泵浦信号不可能是理想的单频信号, 或多或少的包括基波及谐波, 此时, 基波转换效率以及谐波失真被修正为

$$e_{kk} = b_k/a_k \quad k=1,2,\dots \quad (7)$$

$$d_{k1} = b_k/b_1 - a_k/a_1 \quad k=2,3,\dots \quad (8)$$

式中:  $a_k$  和  $b_k$  分别为输入泵浦信号和输出探测信号的第  $k$  阶谐波。 $e_{11}$  为基波转换效率,  $e_{kk}$  ( $k=2,3,\dots$ ) 为高阶谐波的转换效率。总谐波失真表达为

$$\text{THD} = \sqrt{\sum_{n=2} (b_n - a_n e_{11})^2} / \sqrt{\sum_{n=1} a_n^2} |e_{11}| \quad (9)$$

应该指出的是在单频信号的情况下, 式(9)能被简化为式(6)。对于式(9), 为了提高采样线性度, 需要尽可能增加转换效率、减少谐波失真。

## 3 实验结果

全光脉冲采样的实验装置如图 1 所示, 40 GHz 重频的半导体锁模激光器 ( $\lambda_b = 1550.20$  nm) 发出脉宽为 1.4 ps 的脉冲。脉冲序列作为探测光被注入到单个 SOA, 探测脉冲信号的平均功率固定在 0.75 mW, SOA 来自 CIP 公司, 偏置电流为 276 mA。

全光采样系统的传递曲线如图 2 所示, 其表示了输出探测脉冲光与泵浦光功率之间的关系。从曲线可以看出, 要获得较好线性度的采样结果, 那么泵浦光的参数应当控制在适当的范围内, 否则引起非线性失真。利用多项式传递函数方法<sup>[19]</sup>, 可以对不同工作点下的基波转换效率和谐波失真进行计算并优化。如图 3 所示, 在偏置功率为 3 mW 以及峰峰功率为 5 mW 的正弦波形, 可以达到很好的采样结果。

在动态采样实验中, 一束连续光 ( $\lambda_b = 1559.92$  nm) 被调制频率为 2.5 GHz 电信号外调制后作为泵浦光耦合进入 SOA, 其中泵浦光功率

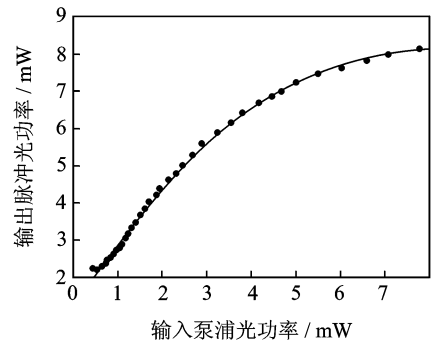


图 2 基于 SOA 全光采样的测量传递曲线

Fig. 2 Measured transfer curve of SOA-based optical sampler

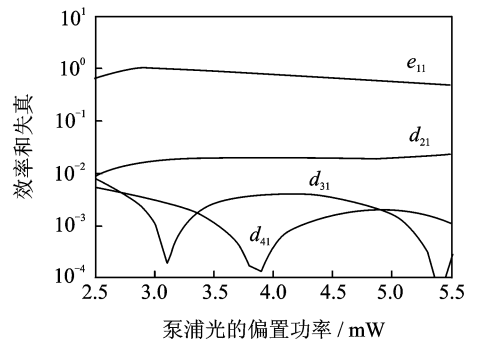


图 3 不同偏置时计算的转换效率与谐波失真

Fig. 3 Calculated efficiency and distortion at different bias of measured transfer curve

范围为 0.5 mW 到 5.5 mW。一个模拟光信号波形被设置成为一个非对称的波形来代替一个标准正弦波形,以便显示更一般的采样情形。当该随时间变化的泵浦光与探测脉冲光一起被注入到 SOA 中,通过探测光 NPR 的控制,使得泵浦光能调制探测光的放大特性。当采样脉冲通过 SOA,采样的模拟信号从泵浦光传递到探测光。图 4 展示了采样的波形图。为方便比较,输入泵浦信号的波形也在图 4 中显示。很明显探测脉冲的包络随着泵浦信号改变而变化,即获得了全光脉冲采样。

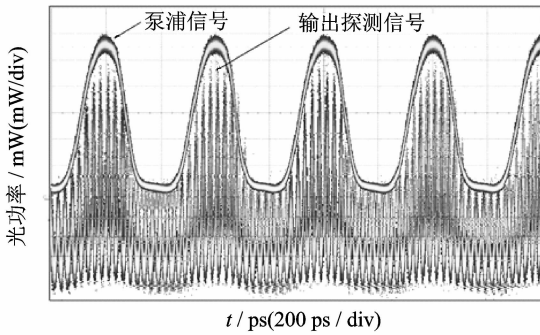


图 4 全光采样的实验波形图

Fig. 4 Experimental waveform of the all-optical sampling

为了验证采样的性能,输入和输出信号都被送入同一个频谱分析仪进行分析。图 4 表示泵浦信号从 2 阶、3 阶、4 阶和 5 阶谐波,以及基频的频谱特征。同时,输出的探测脉冲光的频谱图,如图 5 所示,表示转换效率和谐波失真的特性。表 1 表示测量的全光采样的转换效率和谐波失真,正号和负号分别表示增加和减少。表 1 中基波转换效率 = 1.35,总谐波失真 = 2.01%。

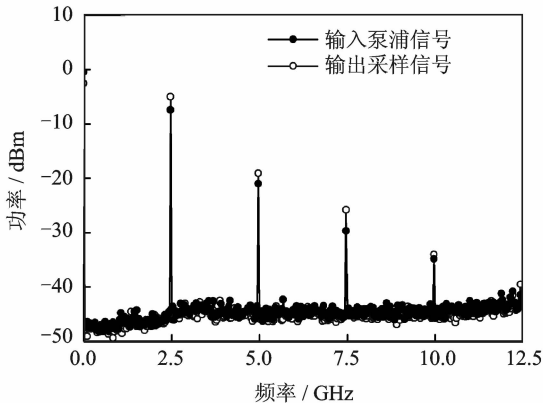


图 5 输入泵浦信号和输出采样脉冲的频谱图

Fig. 5 Electrical spectrum of both input pump signal and output sampling pulses

要进一步提高采样线性,则需要通过线性度评价方法评价,对特定模拟信号的幅度的情况下的采样工作点进行优化。

表 1 转换效率与谐波失真的测量值

Table 1 Measured conversion efficiency and harmonics distortion

$e_{22}$	$e_{33}$	$e_{44}$	$e_{55}$	$d_{21}/\%$	$d_{31}/\%$	$d_{41}/\%$	$d_{51}/\%$
1.26	1.56	1.10	1.23	-1.44	1.24	-0.79	-0.19

进一步地,对 160 GSa/s 的全光脉冲采样进行了验证。160 GHz 的采样脉冲由 40 GHz 的采样脉冲通过两级时分复用器构建而成。模拟光信号则是由一连续光通过 10 GHz 的电信号经由电光调制获得。如图 6 所示,采样脉冲的每条光谱谱线两边均出现了调制边带,且边带的频率间隔为 10 GHz,说明模拟光信号的变化被复制到了采样光脉冲的包络上。

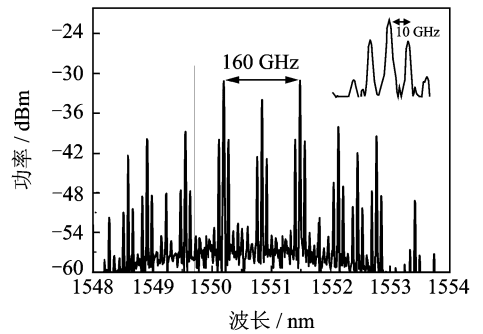


图 6 160 GSa/s 的采样光信号的光谱图

Fig. 6 Optical spectrum of 160 GSa/s sampling signal

## 4 结束语

本文提出了基于 SOA 的非线性偏振旋转效应的全光脉冲采样。不同于传统的数字信号处理方法,本文将较弱的采样脉冲和较强的模拟信号分别作为探测光和泵浦光。采样系统相当于一个被泵浦信号控制的可调放大器,实现了 2.5 GHz 的模拟光信号的 40 GSa/s 全光脉冲采样。尽管由于非线性谐波失真不能被完全克服,但是可以通过优化参数尽可能减小。实验获得了基波转换效率为 1.35 和总谐波失真为 2.01% 的全光采样结果。在此基础上,实现了 160 GSa/s 采样脉冲对 10 GHz 模拟信号的全光脉冲采样。本文采样方法具有结构简单、驱动功率只需几毫瓦,与现有全光网络和光电子集成兼容。同时,脉冲形状得到较好保持、脉冲抖动也较小,采样脉冲的重复频率具有升级

潜力。

#### 参考文献:

- [1] Dorrer C, Kilper D C, Stuart H R, et al. Linear optical sampling [J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2003, 15(12): 1746-1748.
- [2] Vally G C. Photonic analog-to-digital converters [J]. *Opt Express*, 2007, 15(5): 1955-1982.
- [3] Oda S, Maruta A. Two-bit all-optical analog-to-digital conversion by filtering broadened and split spectrum induced by soliton effect or self-phase modulation in fiber [J]. *IEEE Sel Top Quant Elect*, 2006, 12(2): 307-314.
- [4] Oda S, Mao X L, Maruta A, et al. All-optical analog-to-digital conversion based on fiber nonlinearity [J]. *Electron Commun in Japan*, 2004, 88(3): 53-62.
- [5] Andrekson P A. All-optical waveform sampling [C]// *Lasers and Electro-Optics 2009 and the European Quantum Electronics Conference*. Munich: IEEE, 2009: 1.
- [6] Xu C, Liu X. Photonic analog-to-digital converter using soliton self-frequency shift and interleaving spectral filters [J]. *Opt Lett*, 2003, 28(12): 986-988.
- [7] Foster M A, Salem R, Geraghty D F, et al. Silicon-chip-based ultrafast optical oscilloscope [J]. *Nature*, 2008, 456(6): 81-85.
- [8] Cotter D, Manning R J, Blow K J, et al. Nonlinear optics for high-speed digital information processing [J]. *Science*, 1999, 286(5444): 1523-1528.
- [9] Sakaguchi J, Nishida T, Ueno Y. 200-Gb/s wavelength conversion using a delayed-interference all-optical semiconductor gate assisted by nonlinear polarization rotation [J]. *Optics Communications*, 2009, 282(9): 1728-1733.
- [10] Cheng M, Wu C, Hiltunen J, et al. A variable delay optical buffer based on nonlinear polarization rotation in semiconductor optical amplifier [J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2009, 21(24): 1885-1887.
- [11] Fu S N, Zhong W D, Shum P P, et al. All-optical NRZ-OOK-to-RZ-OOK format conversions with tunable duty cycles using nonlinear polarization rotation of a semiconductor optical amplifier [J]. *Optics Communications*, 2009, 282(11): 2143-2146.
- [12] Zhang J Y, Wu J, Feng C, et al. All-optical logic or gate exploiting nonlinear polarization rotation in an SOA and red-shifted sideband filtering [J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2007, 19(1): 33-35.
- [13] Dorren H J S, Lenstra D, Liu Y. Nonlinear polarization rotation in semiconductor optical amplifiers: theory and application to all-optical flip-flop memories [J]. *IEEE Sel Top Quant Elect*, 2003, 39(1): 141-148.
- [14] Yang X, Lenstra D, Khoe G D, et al. Nonlinear polarization rotation induced by ultrashort optical pulses in a semiconductor optical amplifier [J]. *Optics Communications*, 2003, 223(1/3): 169-179.
- [15] Liu Y, Hill M T, Tangdiongga E. Wavelength conversion using nonlinear polarization rotation in a single semiconductor optical amplifier [J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2003, 15(1): 90-92.
- [16] Calabretta N, Liu Y, Huijskens F M, et al. Optical signal processing based on self-induced polarization rotation in a semiconductor optical amplifier [J]. *J Lightw Technol*, 2004, 22(2): 372-381.
- [17] Duan P X, Chen L G, Zhang S J, et al. All-optical 2R regeneration based on self-induced polarization rotation in a single semiconductor optical amplifier [J]. *Chinese Sci. Bull*, 2009, 54(20): 3704-3708.
- [18] Chang W S C. Ed, RF photonic technology in optical fiber links [M]. Cambridge, UK: Cambridge Univ Press, 2002.
- [19] Zhang S J, Liu Y, Li H P, et al. Characterization of nonlinearity using polynomial transfer function of all-optical sampling [J]. *Microwave Opt Technol Lett*, 2011, 53(1): 216-219.

**作者简介:**张尚剑(1978-),男,教授,博士生导师,研究方向:微波光子学、光信号处理,E-mail: sjzhang@uestc.edu.cn;王恒(1991-),男,博士研究生,研究方向:微波光子学;邹新海(1989-),男,博士研究生,研究方向:微波光子学;张雅丽(1981-),女,副教授,研究方向:微波光子学、光通信、集成光学;刘爽(1970-),女,教授,研究方向:光通信与集成光学、光电探测与系统集成等;李和平(1966-),男,教授,研究方向:微波光子学、激光技术与应用等;刘永(1970-),男,教授,研究方向:微波光子学、光通信与集成光学等。