

基于半导体光放大器光判决门的光 2R 再生研究

陈 新 娄彩云 王 强 赵晓凡 余文科 霍 力

(清华大学电子工程系, 北京 100084)

摘要 数值仿真半导体光放大器(SOA)-延迟干涉仪(DI)光判决门的功率传输曲线,给出在 40 Gb/s 速率以下 SOA-DI 光开关的再生特性,进行了 10~40 Gb/s 恶化信号的再生实验验证。由于 SOA 的交叉增益调制(XGM)极度依赖于载流子的恢复时间,在高速时,基于 SOA 的 XGM 效应的反逻辑信号存在明显的码型效应,提出基于 SOA 的瞬时交叉相位调制效应结合交叉增益压缩(XGC)效应的全光 2R(再放大、再整形)再生方案,实现了 100 Gb/s 的归零(RZ)信号的全光 2R 再生。

关键词 光通信;全光 2R 再生;半导体光放大器;交叉增益压缩;瞬时交叉相位调制

中图分类号 TN929.11 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.0906013

Investigation of All Optical 2R Regeneration Based on Semiconductor Optical Amplifier

Chen Xin Lou Caiyun Wang Qiang Zhao Xiaofan Yu Wenke Huo Li

(Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract Power transfer function of a 40-Gb/s 2R (re-amplification and reshaping) regenerator consisting of a semiconductor optical amplifier (SOA) and a delay interferometer (DI) is calculated numerically, and the regeneration performance of the SOA-DI optical gate for the degraded signals at 10~40 Gb/s is experimentally investigated. Because the cross gain modulation (XGM) effect in a SOA depends on the carrier recovery time, inverted logical signal based on XGM experiences severe pattern effect at XGM-SOA-cross gain compression (XGC) regenerator. A novel all-optical 2R regeneration scheme by combining the transient cross phase modulation and XGC effects in SOA is proposed and it successfully demonstrates all-optical 2R regeneration for 100-Gb/s return-to-zero (RZ) signal.

Key words optical communications; all optical 2R regeneration; semiconductor optical amplifier; cross gain compression; transient cross phase modulation

OCIS codes 060.1155; 060.4510; 060.5060; 250.5980

1 引 言

超高速光传输技术是光通信系统和网络的发展趋势。然而,信号在传输过程中因残余色散、非线性、掺铒光纤放大器(EDFA)的放大自发辐射(ASE)噪声等因素而产生畸变,信号的时间和幅度抖动增大,消光比降低,因此,在 40 Gb/s 以上长距

离传输中,对光信号进行再生是十分必要的。当速率接近 100 Gb/s 时,电子器件速度渐趋向于其物理极限,所以普遍的观点是需要采用全光再生技术^[1-2]。全光再生技术根据其实现的功能可以分为 2R 和 3R 再生。2R 再生指的是再放大和再整形,3R 再生还包括再定时。可见光 2R 和 3R 再生中都

收稿日期: 2013-03-26; **收到修改稿日期**: 2013-05-08

基金项目: 国家 973 计划(2011CB301703)、国家自然科学基金(6127532, 61077055)、北京优秀博士论文资助项目(YB20091000301)

作者简介: 陈 新(1989—),男,硕士研究生,主要从事信息光电子学与高速光通信方面的研究。

E-mail: chenxin11@mails.tsinghua.edu.cn

导师简介: 娄彩云(1946—),女,教授,主要从事信息光电子学与高速光通信等方面的研究。

E-mail: loucy@ee.tsinghua.edu.cn

需要再整形,实施这个功能的光判决门(2R 再生器)是解决光通信信号恶化的一个基础。

光判决门即为非线性的光开关,其非线性传输特性可有效地抑制噪声的累积和串扰,从而实现幅度抖动和消光比的改善。光再生要求光判决门具有高的开关速率、低的码型效应等性能。利用光纤^[1,3]或半导体材料[半导体光放大器(SOA)^[2,4]和电吸收调制器^[5]等]的非线性可以实现光判决作用。SOA 是一个增益器件,并且其非线性效应比电吸收调制器(EAM)更强,基于可集成和节能需求,SOA 是优选器件。但受 SOA 载流子恢复时间的限制(即使性能好的器件也仅超过 20 ps),当输入信号的速率较高时,载流子浓度不能恢复到初始值。在连“1”或“0”码时,光判决门会出现与码型有关的高低起伏,信号随之会具有不相同的输出形态,降低了其消光比和 Q 值,限制了系统的工作速率。改进码型效应方案有 SOA-马赫-曾德尔干涉仪(MZI)结构^[4],存在的问题是制造工艺要求高,为了解决器件的损耗,一般在输入的两臂和输出各加一个 SOA,即采用 5 个 SOA 来解决单一 SOA 带来的码型效应问题;另一改进码型效应方案是 SOA-延时干涉仪(DI)结构,利用一个窄带带通滤波器^[6]对 SOA 输出信号进行偏移滤波处理^[2,7]。Contestabile 等^[8-9]在对 SOA 的交叉增益压缩(XGC)效应分析的基础上,采用带光衰减器的 MZI 获得两个反相的逻辑信号,在另一个的 SOA 中基于 XGC 效应实现了 40 Gb/s 信号再生和 80 Gb/s 信号的整形。

本文基于商用 SOA 的参数和功率传输函数,利用数值仿真研究了 SOA-DI 光开关的特性、再生性能及速率限制,进行了 40 Gb/s 信号的 2R 再生实验。针对实现 100 Gb/s 光 2R 再生,提出了利用 SOA 瞬时交叉相位调制(T-XPM)效应的 SOA-XGC 方法,实现了 100 Gb/s 的归零(RZ)信号的全光 2R 再生。

2 数值分析

2.1 SOA-DI 光开关的特性

在 2R 再生中,需要一个光开关用作判决门来实现信号的再生。为了使再生的信号具有较好的幅度均衡性和消光比,通常需要此判决门至少具有如图 1 所示 S 型功率传输曲线。从图中可见,“0”码信号具有较低的通过率,而“1”码信号具有较高的通过率,并可以在信号功率足够大时趋于饱和,用以提高再生信号的消光比,并减小其幅度抖动。

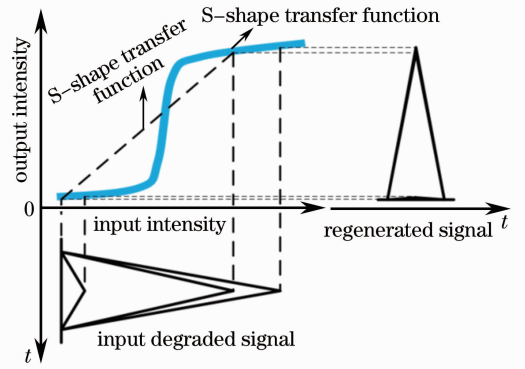


图 1 光开关的传输函数及信号 2R 再生原理
Fig. 1 Power transfer function of optical gate and principle of optical 2R regeneration

采用了课题组基于 Lorenzo Occhi 模型^[10-11]建立的 SOA 分段式理论模型仿真平台,模型中还考虑了 ASE 累积噪声的影响,简化了线宽增强因子的载流子相关性。对 SOA 进行了沿有源区长度方向的分段处理,分段长度为 $\Delta z = v_g \Delta t$,其中 v_g 为信号在有源区中的群速度, Δt 为信号采样时间间隔。建立了 SOA 载流子浓度速率方程、光场在 SOA 中的传输方程。计算中 SOA 的参数为:注入电流 $I = 250$ mA,有源区长度 $L = 500$ μm ,宽度 $w = 2$ μm ,厚度 $d = 150$ nm,限制因子 $\Gamma = 0.32$,微分增益因子 $\alpha_1 = 4 \times 10^{-20}$ m^2 , $\alpha_2 = 7.4 \times 10^{18}$ m^{-3} ,波长相关增益常数 $\alpha_3 = 3.155 \times 10^{25}$ m^4 , $\alpha_4 = 3 \times 10^{-32}$ m^{-4} ,透明载流子浓度 $N_0 = 1.1 \times 10^{24}$ m^{-3} ,总非线性增益压缩因子 $\epsilon_{\text{tot}} = 0.5 \times 10^{-23}$ m^3 ,载流子加热增益压缩因子 $\epsilon_{\text{ch}} = 0.25 \times 10^{-23}$ m^3 ,载流子加热线宽增强因子 $\alpha_{\text{CH}} = 3.0$,有效损耗常数 $a = 8 \times 10^3$ m^{-1} ,线宽增强因子和载流子加热线宽增强因子分别为 6.0 和 3.0。

图 2 为 SOA-DI 光开关的原理图。在虚线框内的 DI 中,通过一个 3 dB 耦合器对输入信号进行分路,这两路信号分别经过延时 $\Delta\tau$ 和附加相移 $\Delta\varphi$ 处理,并在输出端经过分光比为 γ 的耦合器干涉输出。其中 $\Delta\tau$, $\Delta\varphi$ 和 γ 是三个可调参数,得到 DI 的传输函数:

$$H(\omega) = \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{1 - \gamma} \exp(-i\omega\Delta\tau) + \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{\gamma} \exp(i\Delta\varphi). \quad (1)$$

DI 是一个周期性滤波器, $\Delta\tau$, $\Delta\varphi$ 和 γ 的调节可以分别调节自由谱区、形状和透射率。在图 2 的 SOA-DI 中,连续光(CW)(波长为 λ_1)和数据光(波长为 λ_2)通过 3 dB 耦合器输入 SOA,SOA 后加光带通滤波器(OBPF)去除数据光和 SOA 产生的 ASE 噪

声。在该结构中,SOA 作为非线性介质,利用控制光(数据光)对 SOA 增益和折射率的改变来实现对连续光的幅度和相位调制,控制光使探测光产生一个快速、陡峭的相位变化,通过延时干涉来检测这种陡峭的相位变化,因此,从本质上讲 SOA-DI 光开关是基于 SOA 的交叉相位调制(XPM)效应。

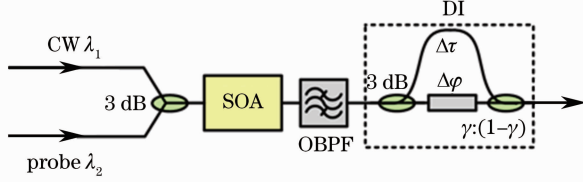


图 2 SOA-DI 装置图

Fig. 2 Schematic setup of SOA-DI

对不同速率下 SOA-DI 光开关的功率传输函数进行数值仿真,计算方法为:假设 SOA-DI 的输入为单个脉冲,在其他条件不变的情况下,仿真 SOA-DI 波长转换信号的功率传输函数。为简化计算同时保持一定精度,假设能够影响当前码的仅与前三个比特时隙的码型有关,因此共有 $2^3 = 8$ 种不同码型。10 Gb/s 时,设信号脉宽为 10 ps,DI 分光比为 0.5,相移为 $\Delta\varphi = 1.02\pi$,DI 延时量为 8 ps,探测光的功率为 6 dBm。在 40 Gb/s 时信号脉宽为 4 ps,DI 分光比为 0.5,相移为 $\Delta\varphi = 1\pi$,DI 延时量为 3 ps,探测光的功率为 6 dBm,

SOA 后由 3 dB 带宽 150 GHz 的高斯型滤波器对信号滤波。通过对 10 Gb/s 及 40 Gb/s 下这 8 种情况的仿真计算得出如图 3 所示的功率传输曲线。从图 3(a)可见,在 10 Gb/s 时,不同码型条件下的功率传输曲线重合得较好,在输入功率较大的时候,输出功率趋于稳定,证明在 10 Gb/s 时 SOA-DI 光开关门具有较好的信号再生功能。当将码速提高至 40 Gb/s 时,图 3(b)给出不同的码型对应的功率传输曲线重合性较差,特别是输入功率较大时,输出信号的功率起伏较高,说明有明显的码型效应。这是由于信号速率提高,SOA 载流子恢复时间大于信号比特周期,在长“0”码之后的“1”码相对于长“1”码后的“1”码会受到更多的增益,因为 SPM 效应产生的相移可近似认为与 SOA 增益成正比,长“0”码之后的“1”码得到的功率大,造成不同码的功率函数不重合,SOA-DI 的输出有幅度抖动,码型效应较严重。由于高增益下信号得到更多的红移啁啾,在 DI 后加蓝移滤波来克服码型效应。图 3(c)为在 40 Gb/s 速率下结合了蓝移滤波的 SOA-DI 开关门功率传输曲线,可以看到,传输曲线在高功率处重合度有较大的提高,改善了输出信号的幅度抖动。上述数值计算表明,对于商用器件,SOA-DI 结合滤波的光开关门可以应用在 40 Gb/s 信号的 2R 再生。

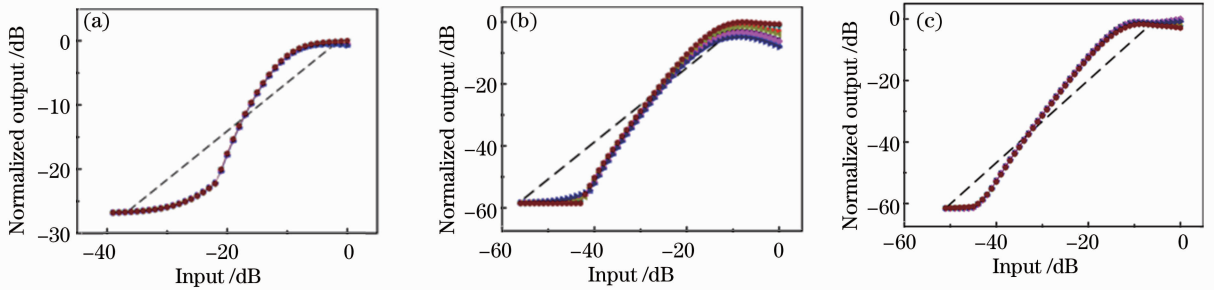


图 3 SOA-DI 功率传输曲线。(a) 10 Gb/s; (b) 40 Gb/s; (c) 40 Gb/s SOA-DI 蓝移滤波

Fig. 3 Power transmission curves of SOA-DI. (a) 10 Gb/s; (b) 40 Gb/s; (c) SOA-DI with blue shift filtering at 40 Gb/s

2.2 基于瞬时交叉相位调制 SOA-XGC 的光开关

基于 SOA-XGC 的全光 2R 再生是由意大利 Pisa 大学的 Contestabile 等^[8]于 2005 年实施的,图 4 给出利用 SOA-XGC 效应进行 2R 再生的原理图。波长分别处于 λ_1 和 λ_2 的逻辑相反信号同步注入 SOA,控制信号的幅度,可使得 SOA 处于深度饱和状态。此时两路信号将随时间经历共同的压缩增益。观察波长处于 λ_1 的信号,由于 SOA 处于深度饱和状态,其“1”码会因受到增益饱和的作用而获得幅度均衡;“0”码对应的是波长处于 λ_2 处的信号的

“1”码,只能获得抑制的或者压缩的增益,使得正逻辑信号的“0”码和噪声得到了相对的抑制,从而使得波长为 λ_1 的正逻辑信号获得 2R 再生。

由 SOA1 的交叉增益调制(XGM)效应获得波长为 λ_2 的反逻辑信号,采取实验室搭建的 SOA 仿真平台,数值模拟了长度为 1 mm 的 SOA 在 25 Gb/s 时 XGM 效应获得的反逻辑信号波形如图 5(a)所示,由于 SOA 的 XGM 效应极度依赖于载流子恢复时间使得转换的信号有码型效应,随着速率的增高,这个反逻辑信号的码型效应加重。图 5(b)为上述反逻辑信

号与正逻辑信号叠加后的注入信号功率随时间的变化及经过 XGC 后的输出波形,可见总的信号功率起伏较大、输出信号的幅度抖动及噪声也大。为了实现 100 Gb/s 或更高速率信号的再生,课题组提出了基于 SOA 的瞬时交叉相位调制(T-XPM)结合 XGC 效应的全光 2R 再生方法,其装置结构图如图 6 所示。利用第一级 SOA 中信号光对探测光的 T-XPM 效应^[11]在脉冲的前、后沿分别产生红移和蓝移啁啾,一个恰当的偏移滤波可以等效加快载流子恢复,获得质量较高、波形较对称的波长转换反逻辑信号,进而使正反逻辑信号的总功率可以以更为稳定的状态同步注入到第二级 SOA 中,图 5(c)为利用 0.6 nm 蓝移滤波时的对应计算结果。装置中,在正逻辑信号的输出端也引入了一个光带通滤

波器,用于滤除正向信号经过 SOA 后的 ASE 噪声,并尽可能让正反逻辑信号经历同样的光程,若两路选用同样的光带通滤波器,理论上可以做到正反逻辑信号的完全同步,可省去同步延时控制单元。

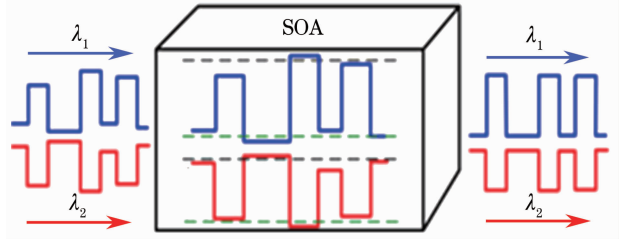


图 4 基于 SOA-XGC 的全光 2R 再生原理图
Fig. 4 Schematic diagram of all optical 2R regeneration based on SOA-XGC

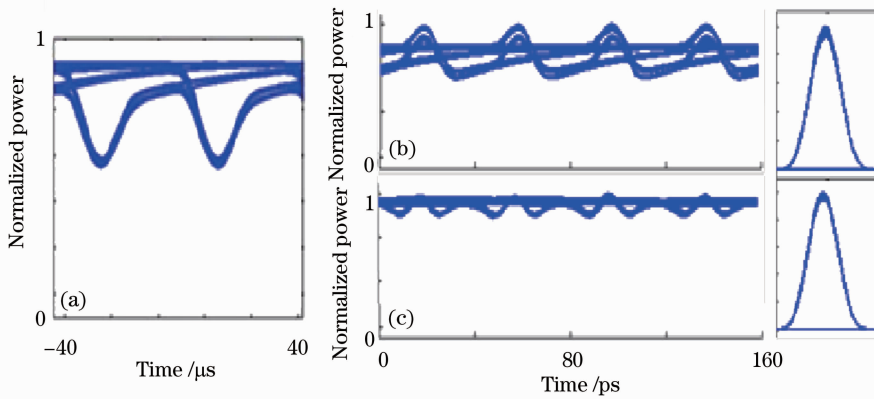


图 5 (a) SOA-XGM 产生的反逻辑信号的眼图; (b) XGM-SOA 的正反逻辑信号功率及 XGC 输出;
(c) T-XPM-SOA 的正反逻辑信号功率及 XGC 的输出

Fig. 5 (a) Eye diagram of inverted logical signal based on SOA-XGM; (b) power of two logical inverted signals from SOA-XGM and output of SOA-XGC; (c) power of two signals from T-XPM and output of SOA-XGC

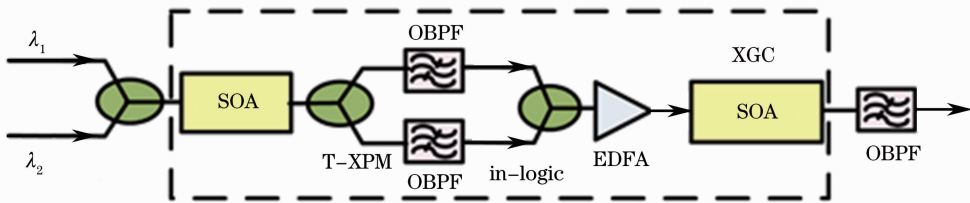


图 6 T-XPM 结合 XGC 的全光 2R 再生器结构

Fig. 6 Schematic diagram of T-XPM-SOA-XGC based 2R regenerator

3 实验结果

利用图 2 的实验装置进行了基于 SOA-DI 的全光 2R 再生,在实验中,超短脉冲源产生 10 Gb/s 的原始信号,时分复用至 20 Gb/s 和 40 Gb/s。

首先进行基于 SOA-DI 的 10 Gb/s 信号 2R 再生,实验中使用一个早期的 SOA 放大原始信号以

得到受码型效应引起幅度抖动的恶化信号,经 2R 再生后,再生信号与原始信号的眼图及误码率 (BER, R_{BE}) 曲线如图 7 所示。通过对比可看出,恶化信号的幅度得到了很好的均衡,抖动基本消除,对比再生前后的误码率曲线可以看出,通过再生使接收机灵敏度提高了约 2.5 dB。实验结果证明,在

10 Gb/s下, SOA-DI 结构很好地实现了恶化信号的 2R 再生。图 7(d) 的 20 Gb/s 恶化信号, 通过带偏移滤波的 SOA-DI 再生, 得到 7(e) 所示的信号眼

图, 眼图显示信号的幅度抖动和噪声得到了良好的改善, 信号的 Q 值提高了 2.3。

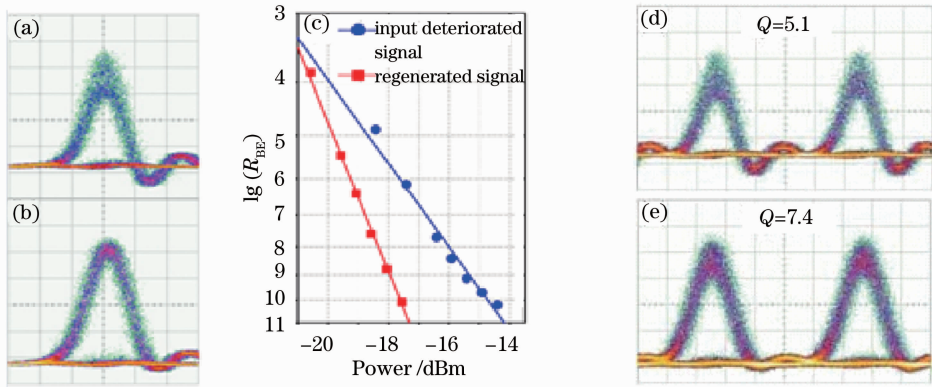


图 7 不同信号速率下的眼图。(a)输入 10 Gb/s 恶化信号;(b) 10 Gb/s 再生信号;(c)再生前后的误码率; (d)输入 20 Gb/s 恶化信号;(e) 20 Gb/s 再生信号

Fig. 7 Eye diagrams of signals of different rates. (a) Input 10 Gb/s deteriorated signal; (b) 10 Gb/s regenerated signal; (c) BER before and after regeneration; (d) input 20 Gb/s deteriorated signal; (e) 20 Gb/s regenerated signal

在进行 40 Gb/s 信号的再生实验时, 采取改变超短脉冲源中铌酸锂强度调制器输入信号的偏振态的方法来实现不同程度的信号恶化, 分别进行再生实验, 所得结果如图 8 所示。输入的不同程度恶化信号如图 8(a)和(d)所示, 由于引入了较大的 ASE 噪声, 信号抖动很严重。经过 SOA-DI 后, 如图 8(b)和(e)

所示, 信号质量得到改善, 眼图较为清晰, 幅度抖动有所变小。经过蓝移滤波后的信号如图 8(c)和(f)所示, 可以看到, 信号的眼图张开得更清晰, 幅度抖动基本消除。以上实验结果说明, 结合了蓝移滤波的 SOA-DI 结构可以实现 40 Gb/s 下高速信号的全光 2R 再生。

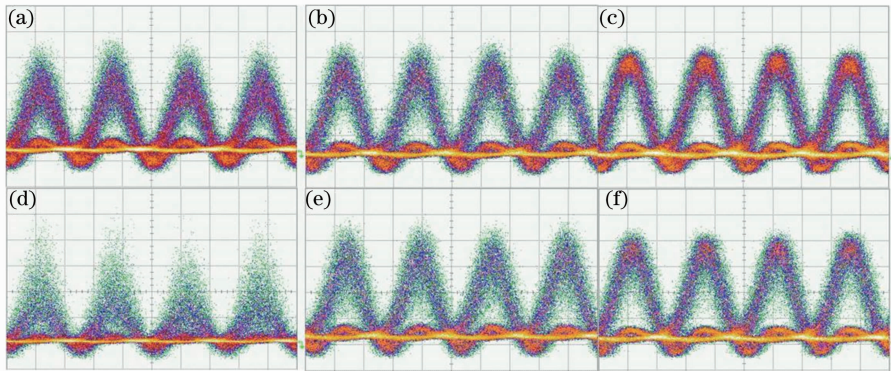


图 8 40 Gb/s 不同程度恶化信号的眼图。(a), (d)输入恶化信号;(b), (e) SOA-DI 再生; (c), (f) SOA-DI-偏移滤波再生

Fig. 8 Eye diagrams of 40 Gb/s signals deteriorated in different extents. (a), (d) Input deteriorated signals; (b), (e) SOA-DI regenerated signals; (c), (f) SOA-DI-OBPF regenerated signals

在实验中, 使用铌酸锂相位调制器(PM)调制分布式反馈(DFB)激光器产生的 CW 光, 经单模光纤(SMF)和高非线性光纤等进行啁啾补偿和脉冲整形, 并加载伪随机码形成 25 Gb/s 的信号, 复用至 100 Gb/s, 使用 EDFA 加载 ASE 噪声形成恶化的初始信号。在接收端, 使用 500 G 光采样示波器观测信号波形, 再生前后的信号眼图见图 9(a)和(b)。

从信号的眼图可以看出, 初始的 100 Gb/s 恶化信号有较大的幅度抖动, 经过再生后, 其幅度的抖动和噪声都得到了有效抑制, 能观测到眼图张开度的提高, 尽管受实验器材 SOA 以及滤波器带宽限制, 脉冲有所展宽, 但是仍然实现了通道间的无干涉叠加。在进一步的实验中, 可以通过选取合适的滤波器波形和参数, 在再生的消光比和脉冲展宽之间达到最

优,实现再生效果的进一步优化。实验结果证明了 T-XPM-SOA-XGC 结构的再生器可以对高速率 RZ

信号(100 Gb/s)进行有效的全光 2R 再生。

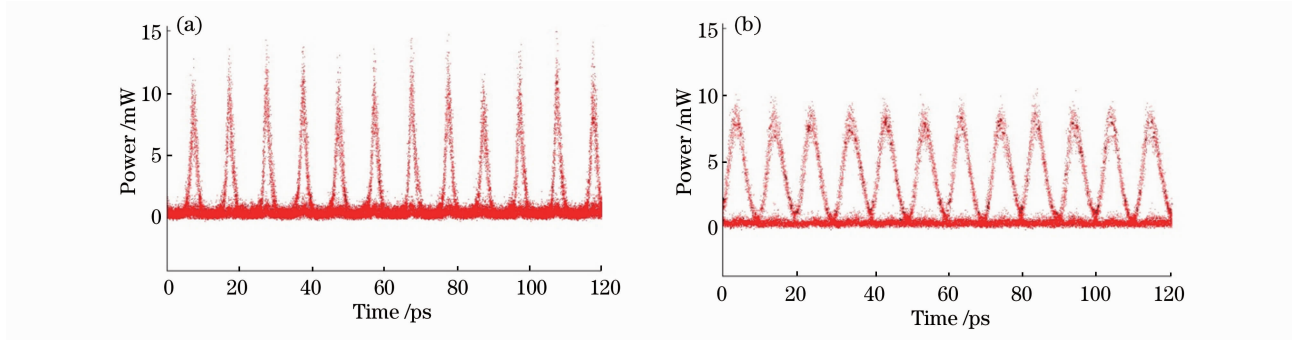


图 9 100 Gb/s 眼图。(a)输入恶化信号；(b) TXPM-SOA-XGC 再生

Fig. 9 Eye diagrams of 100 Gb/s signal. (a) Input deteriorated signal; (b) T-XPM-SOA-XGC regenerated signal

4 结 论

对于 SOA-DI 结构,在 40 Gb/s 速率以下数值仿真其功率传输曲线,并通过实验验证了 SOA-DI 光判决门对于不同速率下恶化信号的再生特性。对于高速率的信号,由于 SOA 的载流子的恢复时间会对 2R 再生带来严重的码型效应,提出了基于 T-XPM-SOA-XGC 的全光 2R 再生方案,实验实现了 100 Gb/s 的 RZ 信号的全光 2R 再生。

参 考 文 献

- 1 M Rochette, L Fu, V Ta'eed, *et al.*. An all-optical solution for BER improvement [J]. *IEEE J Sel Top Quantum Electron*, 2006, 12(4): 736–744.
- 2 C Bornholdt, J Slovak, B Sartorius. Novel all-optical 3R regenerator concept demonstrated at 40 Gb/s [C]. *ECOC 2002*, 2002, 5.
- 3 Wei Yanfen, Zhang Xia, Xu Yongzhao, *et al.*. All-optical regeneration based on highly nonlinear microstructured fiber [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, 27(3): 414–418.
卫艳芬, 张霞, 徐永钊, 等. 基于高非线性微结构光纤的全光再生研究[J]. *光学学报*, 2007, 27(3): 414–418.
- 4 D Apostolopoulos, K Vyrsoinos, P Zakynthinos, *et al.*. An SOA-MZI NRZ wavelength conversion scheme with enhanced 2R

regeneration characteristics [J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2009, 21(19): 1363–1365.

- 5 T Otani, T Miyazaki, S Yamamoto. 40-Gb/s optical 3R regenerator using electroabsorption modulators for optical networks [J]. *J Lightwave Technol*, 2002, 20(2): 195–200.
- 6 Y Liu, E Tangdiongga, H Waardt, *et al.*. Error-free 320-Gb/s all-optical wavelength conversion using a single semiconductor optical amplifier [J]. *J Lightwave Technol*, 2007, 25(1): 103–108.
- 7 J Leuthold, B Mikkelsen, R E Behringer, *et al.*. Novel 3R regenerator based on semiconductor optical amplifier delayed-interference configuration [J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2001, 13(8): 860–862.
- 8 G Contestabile, R Proietti, N Calabretta, *et al.*. All optical regeneration by cross gain compression in semiconductor amplifiers [C]. *ECOC 2005*, 2005, 3.
- 9 G Contestabile, R Proietti, M Presi, *et al.*. 40 Gb/s Wavelength preserving 2R regeneration for both RZ and NRZ signals [C]. *Optical Fiber Communication Conference*, 2008. OWK1.
- 10 L Occhi, L Schares, G Guekos. Phase modeling based on the alpha-factor in bulk semiconductor optical amplifiers [J]. *IEEE J Sel Top Quantum Electron*, 2003, 9(3): 788–797.
- 11 Songnian Fu, Jianji Dong, P Shum, *et al.*. Experimental demonstration of both inverted and non-inverted wavelength conversion based on transient cross phase modulation of SOA [J]. *Opt Express*, 2006, 14(17): 7587–7593.

栏目编辑: 王晓琰