

100 Gb/s 归零码信号的2R再生

陈新 霍力 娄彩云 王强 余文科 姜向宇 赵之玺 章恩耀

A study of 100 Gb/s 2R regeneration for return-to-zero code signal

Chen Xin Huo Li Lou Cai-Yun Wang Qiang Yu Wen-Ke Jiang Xiang-Yu Zhao Zhi-Xi Zhang En-Yao

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 65, 054208 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.054208

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.054208>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I5>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

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

Experimental study on a low switching energy and high-linearity all-optical sampler based on terahertz optical asymmetric demultiplexer

物理学报.2015, 64(15): 154213 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.154213>

复合抛物面聚光器作为可见光通信光学天线的的设计研究与性能分析

Design research and performance analysis of compound parabolic concentrators as optical antennas in visible light communication

物理学报.2015, 64(12): 124212 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.124212>

基于注入锁定法布里-珀罗激光器的光学双稳态及光存储研究

Optical bistability and optical storage based on injection locked Fabry-Perot semiconductor laser

物理学报.2015, 64(4): 044204 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.044204>

结构参数对串联微环谐振腔编解码器性能的影响

Study of structure parameters effect on performance of optical en/decoder based on parallel-cascaded microring resonators

物理学报.2015, 64(3): 034218 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.034218>

基于谐波拟合产生周期性三角形光脉冲串的实验研究

Experimental demonstration on triangular-shaped pulse train generation based on harmonic fitting

物理学报.2014, 63(15): 154210 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.154210>

## 100 Gb/s归零码信号的2R再生\*

陈新 霍力<sup>†</sup> 娄采云 王强 余文科 姜向宇 赵之玺 章恩耀

(清华大学电子工程系, 清华信息科学与技术国家实验室, 北京 100084)

(2015年9月4日收到; 2015年11月19日收到修改稿)

本文提出了基于半导体光放大器(SOA)中的瞬态交叉相位调制(T-XPM)效应与交叉增益压缩(XGC)效应的全光2R再生方法, 同时研究了SOA中的T-XPM效应获得反逻辑码信号以及XGC效应光开关门的特性, 实现了100 Gb/s归零码信号的2R再生, 接收机灵敏度提高了1.7—2 dB; 对该方案中的反逻辑码对于再生效果的影响进行了量化研究, 并在C波段范围内研究了该再生方案的再生效果, 实现了覆盖1535—1555 nm的全光2R再生.

**关键词:** 全光再生, 半导体光放大器, 交叉增益压缩, 瞬态交叉相位调制

**PACS:** 42.79.Sz, 42.70.Nq, 42.65.Re

**DOI:** 10.7498/aps.65.054208

## 1 引言

随着社会的信息化, 通信容量的需求呈指数增长, 基于电时分复用(ETDM)技术提高单信道速率被认为是一种比较经济实用的手段. 过去的十几年中光传输系统的单信道速率从10 Gb/s发展到目前的40 Gb/s并开始商用, 又向100 Gb/s迈进. 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)的自发辐射噪声(ASE)等因素而产生畸变, 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.

全光再生技术根据其实现的功能分为执行再放大和再整形的2R再生以及执行再放大、再整形和再定时功能的3R再生<sup>[1,2]</sup>. 光2R和3R再生中都需要再整形, 整形的功能由光判决门来实现. 光判决门即为非线性的光开关, 利用光纤或半导体材料的非线性可以实现光判决作用, 采用光纤中的自相位调制(SPM)等非线性效应, 已经能够实现

160 Gb/s信号眼图的改善和130 Gb/s有码率改善的2R再生<sup>[3,4]</sup>. 基于光纤的光判决门, 其体积较大, 而电吸收调制器(EAM)是一个吸收型器件<sup>[5]</sup>, 不符合当前的节能要求. 半导体光放大器(SOA)由于体积小, 非线性阈值较低, 且易于集成, 因此受到了广泛的研究和使用. 但受载流子恢复时间的限制, 当输入信号的速率较高时, 载流子浓度不能较快地恢复到初始值就会再次被注入光消耗, 使得增益随时间出现较大幅度的变化, 并随注入码型变化, 即码型效应问题<sup>[6,7]</sup>. 通过在SOA后加偏移滤波可以缓解SOA的码型效应问题<sup>[8,9]</sup>, 已经有课题组实现了320 Gb/s的波长转换, 但是光再生要求负功率代价, 目前文献仅报道了基于同步马赫-曾德尔干涉仪(MZI)结构的84 Gb/s信号3R再生<sup>[10]</sup>, 有码率改善的再生也仅能达到40 Gb/s<sup>[11,12]</sup>. 意大利Pisa大学的Contestabile等<sup>[13]</sup>基于SOA的交叉增益压缩(XGC)效应实现了40 Gb/s信号2R再生和80 Gb/s信号眼图的改善, 但对于更高的速率如100 Gb/s则缺乏进一步的实验和报道. 研究者们基于SOA-XGC效应, 通过利用SOA瞬态交叉相位调制效应(T-XPM)<sup>[14]</sup>实现了基于SOA的速率为

\* 国家重点基础研究发展计划(批准号: 2011CB301703)、国家自然科学基金(批准号: 61275032)和清华大学自主研究计划资助的课题.

<sup>†</sup> 通信作者. E-mail: [lhao@tsinghua.edu.cn](mailto:lhao@tsinghua.edu.cn)

40 Gb/s 的 NRZ-DPSK 信号全光 2R 再生<sup>[15]</sup>, 并对 SOA 的性能进行了优化. 本文在分析基于 SOA 的交叉增益调制 (XGM) 获得反码信号并利用 XGC 效应实现光 2R 再生的基础上, 提出了利用 SOA 瞬态交叉相位调制效应 (T-XPM)<sup>[14]</sup> 获得良好的反码信号、改进基于 SOA-XGC 效应的 2R 再生方法, 首次实现了基于 SOA 的有误差率改善支持的 100 Gb/s 归零码 RZ 恶化信号的全光 2R 再生<sup>[16]</sup>. 通过数值计算理论和实验研究了 SOA 中 T-XPM 效应获得的反码信号质量及对 2R 再生的影响, 给出了实验中所使用的商用 SOA 的增益恢复曲线, 证明了该再生结构基于商用 SOA 的再生能力. 此外, 本文实验研究了该再生结构对于 C 波段的再生效果, 实现了基本覆盖 C 波段的 2R 再生.

## 2 原理与分析

SOA 中的 XGC 效应工作原理如图 1 所示, 两个互为反逻辑、波长分别为  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  的信号同步注入到一个处于增益饱和状态的 SOA 中. 由于这两个信号光互为相反的逻辑信号, 整体上相当于以一个随时间相对恒定的功率总信号注入到 SOA 中. 由于 SOA 处于饱和状态, 此时两路信号将随时间经历共同的压缩下增益, 而不会经历随时间变化的增益, 从而会减小信号通过 SOA 时由于增益变化引起的码型效应<sup>[17]</sup>. 当一路信号为“1”时, 该路信号将耗尽 SOA 的增益, 从而使得位于另一个波长上的逻辑相反的“0”码受到较小的增益, 信号幅度降低, 可以起到提高消光比的作用. 由于 SOA 处于饱和状态, 其输入/输出传输特性在频域上看具有类似高通滤波器的特点, 因此可以抑制幅度上的低频抖动, 从而改善了输出信号的质量. 文献<sup>[9, 10]</sup>介绍了基于第一级 SOA (SOA1) 中的 XGM 效应获得反逻辑信号 (反码) 的 2R 再生, 其装置如图 2 所示. 在马赫-曾德尔干涉仪 (MZI) 一臂中波长为  $\lambda_s$  信号光与直流光 (CW) 注入 SOA1, 利用 SOA1 中的 XGM 效应调制入射直流光, 产生逻辑相反的信号, 滤波器的中心波长与直流光的波长  $\lambda_w$  相同, 以滤出反码信号, SOA 中的 XGM 效应使得探测光信号获得由于载流子快速消耗所致的相对较慢恢复的增益, 后沿会有码型效应, 表现为拖尾. 同时, 在 MZI 另一臂滤出信号光, 将两臂输出的信号经同步并合波注入到第二级 SOA (SOA2) 中.

首先利用 Pump-Probe 技术测量了商用的 SOA (CIP SOA-XN-C-14-FCA) 的增益恢复特性, 将波长位于 1543 nm、功率约为 2 dBm 的直流光和位于 1552 nm、功率约为 -7 dBm 的作为抽运光的频率为 25 GHz、半波全宽为 2 ps 的高斯光脉冲注入 SOA 中, 用 500 GHz 的光采样示波器显示输出, 测得的 SOA 增益恢复时间如图 3 所示, 可以看出 SOA 的功率没有达到饱和<sup>[9]</sup>. 此外, 25 GHz 光脉冲的间隔为 40 ps, SOA 增益恢复时间  $\geq 40$  ps, 增益恢复时间远大于 100 Gb/s 信号的相邻脉冲时间间隔 10 ps. 因此, 如果不对方案加以改进, 而是采取直接滤波的方式, 得到的反逻辑信号会受到与码型相关的增益的波动, 从而受到码型效应的影响.

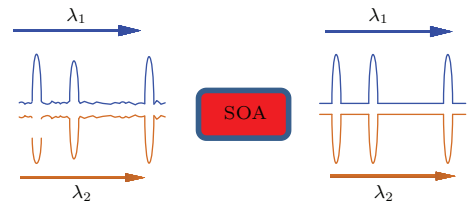


图 1 SOA 中 XGC 效应工作原理

Fig. 1. Working principle of XGC effect in SOA.

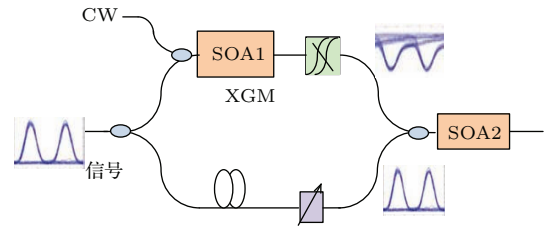


图 2 SOA 中 XGM 获得反码的装置

Fig. 2. Experimental setup for logic-inverted signal based-on XGC.

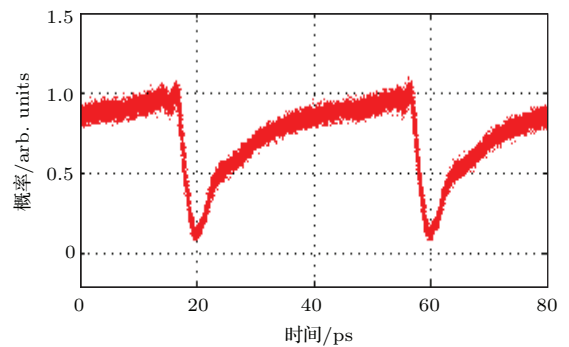


图 3 SOA 的增益恢复特性

Fig. 3. Gain recovery performance of SOA.

本文数值模拟了基于 SOA 中 T-XPM 效应对获得的反码信号质量的改善. 在 SOA 中的 T-XPM 效应因为相位调制项主要由载流子脉动效应

与载流子加热效应贡献, 而载流子加热效应通常为百飞秒级, 其对应贡献为快速的蓝移啁啾项, SOA 后加带通滤波器偏移滤波滤出蓝移啁啾部分则可以实现等效加快增益恢复. 本文采用了分段 SOA 动态数值理论模型, 数值研究了通过 SOA 信号的快速啁啾特性, 不同偏移滤波滤出反码波长及与正码合波的功率变化. 模型中考虑了 ASE 累积噪声的影响, 简化了线宽增强因子的载流子相关性, 信号在 SOA 的光场传输方程中考虑了 SOA 中主要的带内带外效应. 在模拟计算中采用对 SOA 沿有源区长度分段的模型, 其载流子浓度方程如下:

$$\frac{\partial N_m}{\partial t} = \frac{I_m}{qwd\Delta z_m} - R(N_m) - v_g \left( \frac{g_{m,P}}{1 + \varepsilon S_m} S_{m,P} + \frac{g_{m,D}}{1 + \varepsilon S_m} S_{m,D} + \sum_{j=1}^J \frac{g_{m,ASE}}{1 + \varepsilon S_m} S_{m,ASE}^j \right),$$

其中, 方程等号右边第一项代表电流注入引起的载流子浓度变化, 第二项代表载流子复合引起的浓度变化, 第三、第四项代表受激辐射引起的载流子浓度的变化, 最后一项代表 ASE 噪声引起的载流子浓度的变化.

在对分段的增益计算中, 采用多项式模型<sup>[17]</sup>进行拟合如下:

$$g_m(\lambda, N) = c_N[\lambda - \lambda_z(N)]^2 + d_N[\lambda - \lambda_z(N)]^3,$$

在此基础上, 可以得到分段的增益表达式为

$$G_m = \exp \left[ \frac{\Gamma g_m(\lambda, N)}{1 + \varepsilon S_m} - \gamma \right] \Delta z,$$

其中,  $\Gamma$  为有源区的模式限制因子,  $\gamma$  为 SOA 的损耗.

同样, 光场相位的变化可以用下式表示:

$$\frac{d\varphi_m}{dz} = -\frac{1}{2}\alpha_N \Gamma g_m + \frac{1}{2}\alpha_{CH} \varepsilon_{CH} S_m \frac{\Gamma g_m}{1 + \varepsilon S_m},$$

其中,  $\alpha_N$  反映由 SOA 中载流子浓度变化引起的折射率和增益变化;  $\alpha_{CH}$  反映由 SOA 中载流子温度变化引起的折射率和增益变化;  $\varepsilon_{CH}$  为载流子加热非线性增益压缩系数. 根据以上分析, 可以得到分段的光场输出复振幅包络和平均光子浓度分别为

$$P_m = P_{m-1} \sqrt{G_{m,P}} \exp(i\varphi_{m,P}),$$

$$S_{m,P} = P_{m-1}^2 \frac{G_{m,P} - 1}{wdv_g E_p \ln G_{m,P}}.$$

此外, 根据对分段单独产生以及双边注入的 ASE 噪声的分析, 可以得到噪声的平均光子浓度表达式为

$$S_{m,ASE}^j = \left[ \left( \frac{2R_{sp}E_{ASE}\Delta z}{wd \ln G_m} + A_{m-1}^+ + A_{m+1}^- \right) \frac{G_m - 1}{\ln G_m} \right]$$

$$- 2 \frac{R_{sp}E_{ASE}\Delta z}{wd \ln G_m} \frac{1}{E_{ASE}v_g}.$$

在对上述模型的计算中, SOA 沿有源区长度方向分段长度为  $\Delta z = v_g \Delta t$ , 其中  $v_g$  为信号在有源区中的群速度,  $\Delta t$  为信号采样时间间隔. 计算中 SOA 的参数为: 注入电流  $I = 500$  mA, 有源区长度  $L = 2000$   $\mu\text{m}$ , 宽度  $w = 2$   $\mu\text{m}$ , 厚度  $d = 150$  nm, 限制因子  $\Gamma = 0.32$ , 微分增益因子  $\alpha_1 = 4 \times 10^{-20}$   $\text{m}^2$ ,  $\alpha_2 = 7.4 \times 10^{18}$   $\text{m}^{-3}$ , 波长相关增益常数  $\alpha_3 = 3.155 \times 10^{25}$   $\text{m}^4$ ,  $\alpha_4 = 3 \times 10^{-32}$   $\text{m}^{-4}$ , 透明载流子浓度  $N_0 = 1.1 \times 10^{24}$   $\text{m}^{-3}$ , 总非线性增益压缩因子  $\varepsilon_{\text{tot}} = 1.5 \times 10^{-23}$   $\text{m}^3$ , 载流子加热增益压缩因子  $\varepsilon_{\text{CH}} = 0.25 \times 10^{-23}$   $\text{m}^3$ , 载流子加热线宽增强因子  $\alpha_{\text{CH}} = 3.0$ , 有效损耗常数  $a = 8 \times 10^3$   $\text{m}^{-1}$ , 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, 仿真结果如图 4 所示.

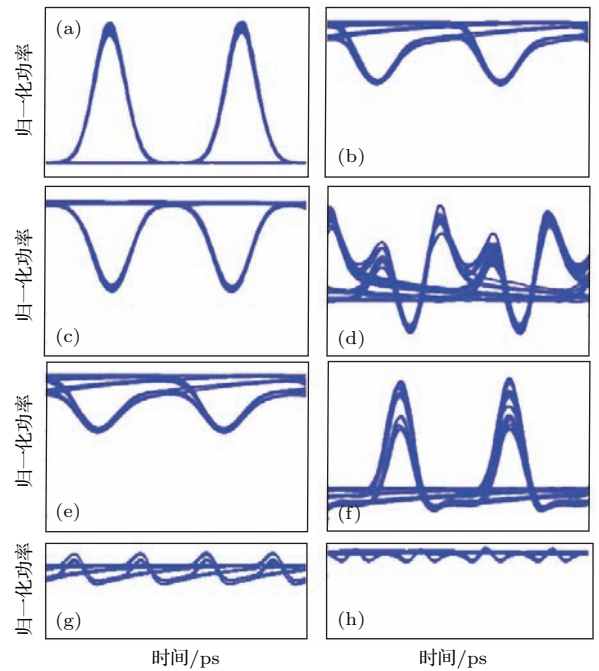


图 4 (a) 正码信号; (b) 无偏移滤波时的反转波长转换信号眼图; (c) 蓝移 0.6 nm 时的输出信号眼图; (d) 蓝移 0.96 nm 时输出信号眼图; (e) 红移 0.24 nm 时的输出信号眼图; (f) 红移 0.96 nm 时的输出信号眼图; (g) 为正码 (a) 与反码 (b) 合成; (h) 为正码 (a) 与反码 (c) 合成

Fig. 4. Eye diagrams of (a) original signal and logic-inverted signals with OBPF (b) no shift, (c) blue shift 0.6 nm, (d) blue shift 0.96 nm (e) red shift 0.24 nm and (f) red shift 0.96 nm; (g) eye diagram of combination of original signal and logic-inverted signal with OBPF no shift; (h) eye diagram of combination of original signal and logic-inverted signal with OBPF blue shift 0.6 nm.



仿真中注入信号为光时分复用的100 (4 × 25) Gb/s 信号, SOA的增益恢复时间为40 ps, 图4(a)–(f)分别为正码信号、滤波器与 $\lambda_W$ 中心波长相同, 蓝移0.6, 0.96 nm, 红移0.24, 0.96 nm时的反码信号眼图. 图4(b)为没有偏移(即为单纯XGM效应)的反码信号, 信号拖尾是由SOA慢增益恢复所致; 图4(c)为蓝移0.6 nm时的反码信号眼图, 拖尾部分基本消除, 波形较为对称且眼图也很清晰; 继续加大蓝移时, 反码型有朝正向变化的趋势且眼图比较混乱. 而利用红移滤波时, 增益恢复改善非常不明显, 在红移滤波增大到0.96 nm时演化成正向的波长转换信号, 但信号幅度抖动较大. 图4(g)为正码信号与滤波器无偏移由XGM效应产生的反码信号合成后的波形, 图4(h)为正码信号与滤波器蓝移0.6 nm的反码信号合成的波

形. 从波形图可以明显看出, 无偏移滤波时(仅利用XGM效应), 总功率随时间抖动较明显, 这主要是由于反码信号较长的拖尾造成; 而引入蓝移滤波后, 由于反向信号对称性提高, 总信号抖动明显较无偏移滤波时小.

基于上述分析, 本文提出利用T-XPM效应产生较高质量的反码来改善基于SOA-XGC的再生, 结构如图5所示. 恶化信号和直流光共同注入SOA1, 输出经光耦合器分成两部分, 在一臂上滤波器OBPF2偏移 $\lambda_W$ 中心波长实施蓝移偏移滤波提取T-XPM过程产生的蓝移啁啾分量, 即相当于实现了后沿增益的增强; 另一臂(OBPF1)滤出原始信号(正码), 光延迟线(ODL)用于调节正、反码信号同步.

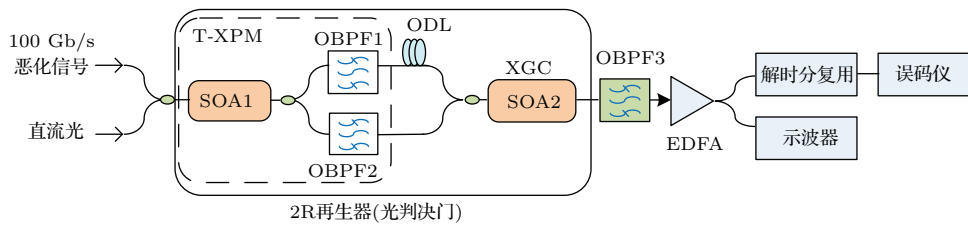


图5 基于SOA-XGC中T-XPM的再生装置

Fig. 5. Experimental setup of regenerator based on T-XPM in SOA.

### 3 实验结果与分析

采用如图5所示的实验装置, 光源为由铷酸锂相位调制器(PM)调制分布式反馈(DFB)激光器产生的CW光, 经单模光纤(SMF)和高非光纤等进行啁啾补偿和脉冲整形, 并加载码长为 $2^{31} - 1$ 的伪随机码形成25 Gbit/s的原始信号, 时分复用至100 Gb/s并使用信噪比恶化以得到待再生的恶化信号. 本实验研究了偏移滤波的方向和距离对产生的反码信号质量的影响, 并找出获得优质反码信号的偏移滤波量, 其装置结构如图5中T-XPM小方框. 中心波长为1552 nm的100 Gb/s信号光与1542.9 nm波长的直流光经耦合注入SOA1中, 其中信号光和直流光的功率分别为-2和5.6 dBm. 图6(a)–(d)分别为OBPF2相对于 $\lambda_{CW}$ 的0.72和0.36 nm蓝移、不偏移和0.36 nm红移时的反码信号, 实验结果给出在0.7 nm蓝移时产生的反码信号的眼图睁开度大、质量最好, 与数值模拟相符合.

本文对图5所示的基于SOA的T-XPM产生反码、XGC效应再生进行了100 Gb/s RZ码恶化信号的全光2R再生实验. 信号光被EDFA的自发辐射噪声(ASE)恶化为如图7(a)所示的幅度抖动和眼皮睁开度, 100 Gb/s恶化信号与波长位于1542.9 nm的直流光注入SOA1中, 利用OBPF2对反码信号进行蓝移滤波, 从恶化的100 Gb/s信号获得如图7(b)所示的眼图清晰的反码信号. 正、反码两路信号经同步和耦合后的波形如图7(c)所示, 可以看出, 基于T-XPM效应获得的反、正码信号能够有效互补, 以一个恒定的功率注入第二级SOA中. 利用OBPF3滤出由XGC效应再生的100 Gb/s信号如图7(d)所示, 与图7(a)对比, 再生信号的幅度抖动和眼皮睁开度得到改善. 将再生的100 Gb/s信号进行时钟恢复和时分复用, 依次得到四路25 Gb/s信号, 由误码仪测试它们的误码曲线(Re. 1, Re. 2, Re. 3和Re. 4), 所得结果如图7(e)所示. 为进行对比, 图7(e)还给出从输入的100 Gb/s OTDM恶化信号解复用得到的四路

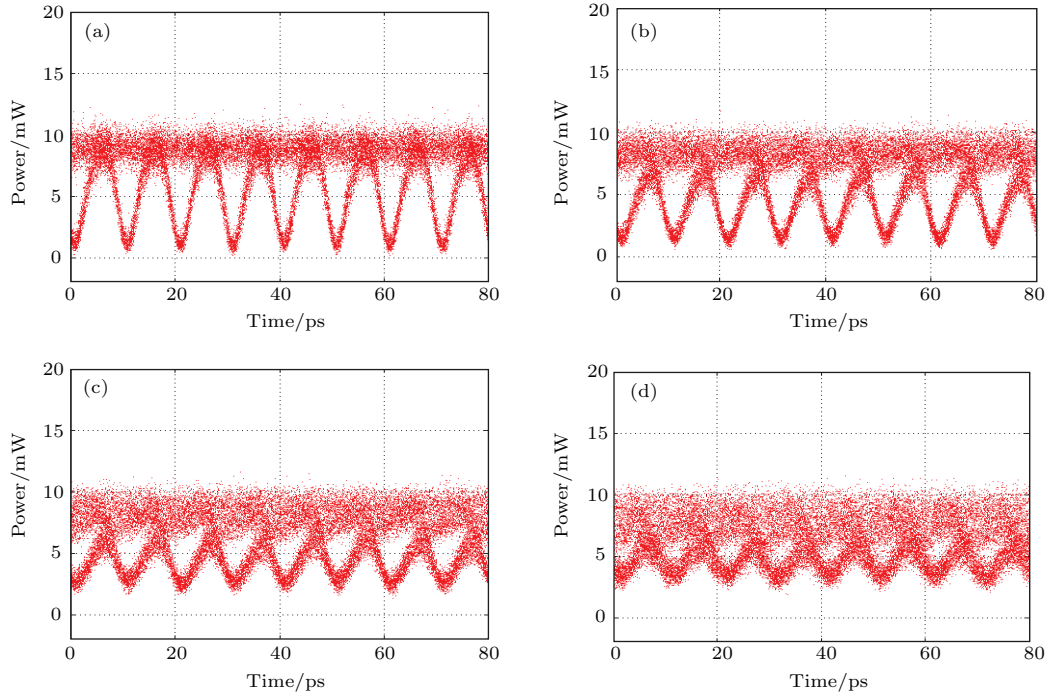


图6 滤波器OBPF在相对于CW光波长蓝移 (a) 0.72 nm, (b) 0.36 nm, (c) 不偏移; (d) 0.36 nm 红移时反码信号的眼图

Fig. 6. Eye diagrams of logic-inverted signals with OBPF: (a) Blue shift 0.72 nm; (b) blue shift 0.36 nm; (c) no shift; (d) red shift 0.36 nm.

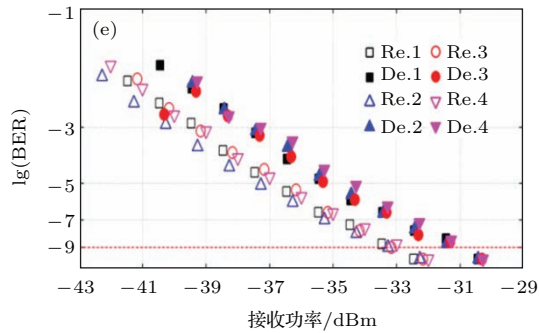
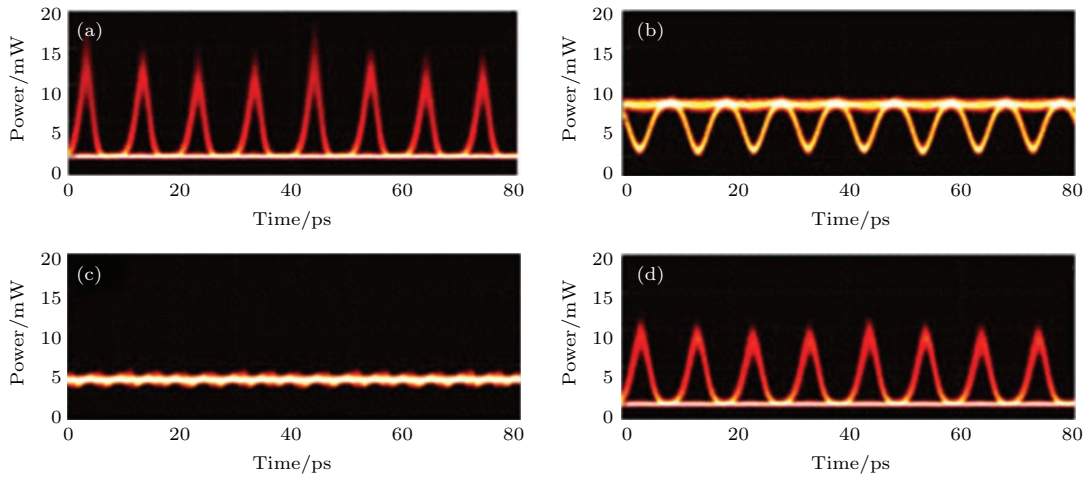


图7 (网刊彩色) (a) 恶化的 100 Gb/s OTDM 信号; (b) 100 Gb/s 反码信号; (c) 100 Gb/s 正、反码合波的信号; (d) 再生的 100 Gb/s 信号; (e) 信号波长为 1542 nm 的误码曲线

Fig. 7. (color online) Eye diagrams of (a) original degraded 100 Gb/s OTDM signal, (b) logic-inverted signal, (c) combination of original and logic-inverted signals, (d) regenerative signal, (e) BER curves of regenerative and degraded signals.

25 Gb/s 信号 (De. 1, De. 2, De. 3 和 De. 4) 的误码曲线. 从图中可以看出, 当误码率为  $10^{-9}$  时, 四路 25 Gb/s 再生信号的接收灵敏度分别改善了 1.7, 1.8, 1.8 和 2 dB, 实验证明了该结构对于 100 Gb/s OTDM-OOK 恶化信号的再生能力.

本文研究了该结构对于 C 波段内不同波长恶化信号的再生特性, 其波长分别为 1535.2, 1539.7, 1542.0, 1546.0, 1549.0, 1551.0 和 1555.0 nm, 在实验中使用的 CW 光的波长与信号波长蓝移为 8—10 nm. 本文针对每个波长的实验进行了相关参数的优化, 图 8 给出上述 7 个波长的恶化信号、再生信号的  $Q$  值及  $Q$  值改善, 除了信号为 1535.2 nm 外, 恶化信号的  $Q$  值均改善了约 2 dB. 1535.2 nm 波长处  $Q$  值之所以改善差, 是因为在此波长 EDFA 增益降低, 引入了较大的噪声.

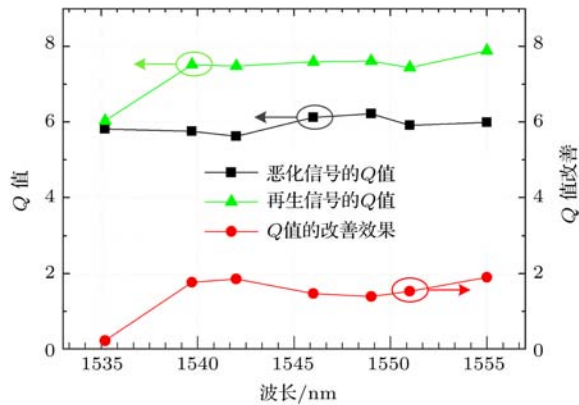


图8 在 1535—1555 nm 恶化、再生信号的  $Q$  值及  $Q$  值改善

Fig. 8.  $Q$  factors of degraded signals and regenerated signals and their improvements at different wavelengths from 1535 nm to 1555 nm.

## 4 结 论

本文提出了基于 SOA 中 T-XPM 效应获得高质量的反逻辑码信号, 利用 SOA-XGC 效应的光 2R 再生方法, 研究了不同的偏移量对反码质量的影响, 实现了 100 Gb/s RZ 信号的全光 2R 再生, 再

生信号的接收灵敏度改善为 1.7—2 dB, 同时实验验证了该结构对于 1535—1555 nm 波长范围内的再生效果.

## 参考文献

- [1] Öhman F, Mørk J 2006 *J. Lightwave Technol.* **24** 1057
- [2] Boscolo S, Turitsyn S K, Mezentsev V K 2005 *J. Lightwave Technol.* **23** 304
- [3] Murai H, Kanda Y, Kagawa M, Arahira S 2010 *J. Lightwave Technol.* **28** 910
- [4] Parmigiani F, Vorreau P, Provost L, Mukasa K, Takahashi M, Petropoulos P, Richardson D J, Freude W, Leuthold J 2009 *Proceedings of Optical Fiber Communication Conference San Diego, CA, March 20–24, 2009* paper JThA56
- [5] Murai H, Kagawa M, Tsuji H, Fujii K 2005 *IEEE Photonics Technol. Lett.* **17** 1965
- [6] Nielsen M L, Mørk J, Sakaguchi J, Suzuki R, Ueno Y 2005 *Proceedings of Optical Fiber Communication Conference Anaheim, CA, March 22–26, 2005* paper OthE7
- [7] Xu J, Zhang X L, Mørk J 2010 *IEEE J. Quantum Electron.* **46** 87
- [8] Nakamura S, Tajima K 1997 *Appl. Phys. Lett.* **70** 3498
- [9] Liu Y, Li Z, Huug de Waardt A, Koonen M J, Khoe G D, Shu X W, Bennion I 2007 *J. Lightwave Technol.* **25** 103
- [10] Ueno Y, Nakamura S, Tajima K 2001 *IEEE Photonics Technol. Lett.* **13** 469
- [11] Zhu Z Q, Masaki F, Zhong P, Lucas P, David H L 2007 *J. Lightwave Technol.* **25** 504
- [12] Tsiokos D, Bakopoulos P, Avramopoulos A, Poustie G, Maxwell H 2006 *Electron. Lett.* **42** 817
- [13] Contestabile G, Proietti R, Calabretta N, Ciaramella E 2007 *J. Lightwave Technol.* **25** 915
- [14] Dong J J, Fu S N, Zhang X L, Shum P 2006 *IEEE Photonics Technol. Lett.* **18** 2554
- [15] Cao T, Chen L, Yu Y, Zhang X 2014 *Opt. Express* **22** 32138
- [16] Chen X, Huo L, Jiang X Y, Lou C Y 2015 *Opt. Express* **23** 23143
- [17] Leuthold J, Mayer M, Eckner J, Guekos G, Melchior H, Zellweger C 2000 *J. Appl. Phys.* **87** 618

# A study of 100 Gb/s 2R regeneration for return-to-zero code signal\*

Chen Xin Huo Li<sup>†</sup> Lou Cai-Yun Wang Qiang Yu Wen-Ke Jiang Xiang-Yu  
Zhao Zhi-Xi Zhang En-Yao

(Tsinghua National Laboratory for Information Science and Technology, Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

( Received 4 September 2015; revised manuscript received 19 November 2015 )

## Abstract

Quality of optical signal can be severely degraded after a long distance optical fiber transmission, therefore all-optical 2R (re-amplification, re-shaping) regeneration is required for its low power consumption and good potential of high-speed operation. Semiconductor optical amplifier (SOA) is a very promising candidate for regeneration due to its relatively low nonlinear switching power threshold and possibility of integration. However, speeds of the existing 2R schemes based on SOAs are limited by pattern effects introduced by the long carrier recovery time. So far, most of experimental results for SOA-based regeneration schemes have been limited to 40 Gb/s, only a few demonstrations at 80 Gb/s are available. An effective method to cope with the pattern effects in the SOA is to employ cross gain compression (XGC) effect. Simultaneously injecting two signals of different wavelengths with complementary logics and balanced powers into the SOA leads to an almost constant ability to make the XGC effect intrinsically immune to the pattern effects. Previously, 2R experimental results were demonstrated at 10 Gb/s and 40 Gb/s with XGC respectively, but no further results of higher speed have been presented to date. In this study, we improve the previous two-stage configuration for XGC-based regeneration by introducing a transient cross phase modulation (T-XPM) in the first SOA for generating the high-quality logic-inverted signal, which, as we find, is essential to facilitating the high-speed XGC operation in the next SOA. Firstly, a numerical model of the photon-electron dynamics in an SOA is built with considering the ultrafast intra-band processes, amplified spontaneous emission (ASE) noise at multiple wavelengths, and device segmentation along propagation direction. The quality of the logic-inverted signal with different offsets of the filter wavelength for T-XPM is studied with the model. It is found that the appropriate blue-shift detuning of the filter wavelength greatly helps to improve the quality of the logic-inverted signal. In experiment, the influence of the filter offset on the quality of the logic-inverted signal is also investigated systematically and the best quality and the largest eye-opening of the logic-inverted signal are achieved with a blue-shift of 0.72 nm, which are consistent with the simulation result. With the best logic-inverted signal, XGC effect is deployed in the second SOA. Effective reduction of the amplitude fluctuation can be observed by comparing the eye diagrams of the input degraded with output regenerative signals. Bit error rates (BERs) are also measured for all four tributaries of the degraded and the regenerated signals and the receiving sensitivity at a BER of  $10^{-9}$  is improved by 1.7–2 dB. Such results show that the XGC-based 2R regeneration scheme is effective even at a speed of as high as 100 Gb/s with the help of high-quality logic-inverted signal. Degraded signals at different wavelengths (from 1535 nm to 1555 nm) are successfully regenerated with  $Q$ -factor improvement, demonstrating the wavelength-independent regeneration capability of the XGC-based 2R regenerator.

**Keywords:** all optical regeneration, semiconductor optical amplifier, cross gain compression, transient cross phase modulation

**PACS:** 42.79.Sz, 42.70.Nq, 42.65.Re

**DOI:** [10.7498/aps.65.054208](https://doi.org/10.7498/aps.65.054208)

\* Project supported by the National Basic Research Program of China (Grant No. 2011CB301703), the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61275032), and the Tsinghua University Scientific Research Program, China.

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: [lhao@tsinghua.edu.cn](mailto:lhao@tsinghua.edu.cn)