

基于 SOA 光纤环镜的 NRZ 信号时钟分量提取的数值模拟*

洪伟 黄德修

(华中科技大学光电子工程系, 武汉 430074)

摘要 采用半导体光放大器(Semiconductor Optical Amplifier, SOA)的分段模型,对基于 SOA 光纤环镜的非归零(Non-Return-to-Zero, NRZ)信号时钟分量提取进行了数值模拟. SOA 光纤环镜可以将 NRZ 信号转化为包含其时钟分量的伪归零(Pseudo-Return-to-Zero, PRZ)信号. 给出了 2.5 Gb/s 下的模拟计算结果,并与实验结果进行了比较,进一步给出了 10 Gb/s 下的模拟计算结果.

关键词 半导体光放大器(Semiconductor Optical Amplifier, SOA); SOA 光纤环镜; 时钟分量提取; 非归零(Non-return-to-zero, NRZ); 伪归零(Pseudo-return-to-zero, PRZ)

中图分类号 TN245 文献标识码 A

0 引言

全光时钟提取是实现全光 3R 再生的关键技术之一,采用锁模激光器^[1]和光锁相环^[2]只能实现归零(Return-to-Zero, RZ)信号的光时钟提取,而对于目前广泛使用的非归零(Non-return-to-zero, NRZ)信号,由于其自身不含时钟分量,不能直接提取光时钟,必须先将 NRZ 信号转换为包含其时钟分量的伪归零(Pseudo-return-to-zero, PRZ)或 RZ 信号.

目前基于半导体光放大器(Semiconductor Optical Amplifier, SOA)的干涉仪型装置在全光信号处理领域受到了广泛的重视,利用 SOA 的非线性效应,可能实现在一个器件上多种全光信号处理功能的集成. SOA 光纤环镜^[3](基于 SOA 的非线性光纤环镜,或称 Sagnac 干涉仪)除了可以实现 3R 再生、全光解复用等^[4]之外,也可以实现 NRZ 信号时钟分量的提取. 文献[5]首次利用 SOA 光纤环镜将 NRZ 码转换为 PRZ 码,并以此 PRZ 码注入锁模光纤激光器,成功地提取了光时钟,但该方案只能在原 NRZ 信号的上升沿提取时钟分量. 文献[6]同样采用 SOA 光纤环镜的结构,却利用了 SOA 中的交叉相位调制(Cross Phase modulation, XPM)效应,在原 NRZ 信号的上升沿和下降沿均能提取时钟分量. 这些方案虽然都有实验报道,却并未见到更深入的研究,通过数值模拟预计系统参数对其输出特性和工作速率的影响是相当重要的. 本文对后一种方案进行了数值模拟.

1 系统构成

基于 SOA 光纤环镜的 NRZ 信号时钟分量提取

系统如图 1 所示. 3 dB 耦合器同侧的两个端口分别连接到 SOA 的两端构成一个环,耦合器的另两个端口则分别构成环镜的输入和输出端口. 另外,环中还串接了光延时线(Optical Delay Line, ODL),用于调整 SOA 在环中的位置;波分复用器(Wavelength Division Multiplexer, WDM),用于波长为 λ_1 的 NRZ 泵浦光信号的注入;以及两个偏振控制器(Polarization Controller, PC),用于调节环的偏置. 波长为 λ_2 的连续波(Continuous Wave, CW)信号作为探测光从环镜的输入端口输入,在环镜的输出端口用光带通滤波器滤除波长为 λ_1 的原 NRZ 信号,得到波长为 λ_2 的转换输出信号.

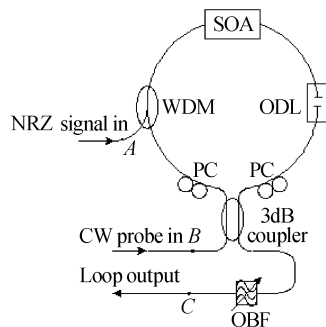


图 1 系统构成示意图
Fig. 1 Schematic diagram of system configuration

2 数值模型

忽略载流子加热(CH)、光谱烧孔(SHB)等效应,另外,考虑到在深饱和状态下,放大的自发辐射(ASE)受到很强的抑制,忽略 ASE 的影响是合理的. 如果采用载流子寿命 τ 描述总的自发辐射和非辐射复合速率,在分段模型下,每个子段中载流子浓度的速率方程可以表示为^[3]

$$\frac{dN_j(t)}{dt} = \frac{J}{qd} - \frac{N_j(t)}{\tau} - \sum_k \frac{\Gamma g_{k,j} P_{k,j}^{av}(t)}{h\nu A} \quad (1)$$

式中 $k = 1, 2, cw, 2, ccw$, 分别代表泵浦光、顺时针方向(clockwise, cw)传播的探测光和逆时针方向(counter-clockwise, ccw)传播的探测光; j 为子段序

*国家 973 计划(G2000036605)资助项目
Tel: 027-87543855-1 Email: cloudcottage@163.com
收稿日期: 2003-02-24

号; N_j 为第 j 段中的载流子浓度; $P_{k,j}^w$ 为第 k 个光在第 j 段中的平均光功率; J 为注入电流密度; q 为电子电量; d 为有源区的厚度; τ 为载流子寿命; Γ 为模场限制因子; h 为 Planck 常数; A 为有源区横截面积; ν 为光脉冲的中心频率; $g_{k,j}$ 为第 k 个光在第 j 段中的增益系数, 它与载流子浓度和波长有关, 有下面的经验公式^[7]

$$g_{k,j} = a(N_j(t) - N_1) - r_2(\lambda_k - \lambda_j^p)^2 + r_3(\lambda_k - \lambda_j^p)^3 \quad (2)$$

$$\lambda_j^p = \lambda_1 - k_0(N_j(t) - N_1)$$

式中 a, r_2, r_3 为增益常数, r_2 与增益谱带宽有关, r_3 与增益谱的不对称性有关; N_1 为透明载流子浓度; λ_k 为第 k 个入射光的波长; λ_j^p 为相应载流子浓度 N_j 下 SOA 的增益峰值波长, λ_1 为透明增益峰值波长; k_0 为峰值波长漂移系数.

由于 SOA 有源区有效折射率与载流子浓度的相关性, 第 k 个光在第 j 段后获得附加相位 $\phi_{k,j}$

$$\phi_{k,j} = -2^{-1} \alpha_{k,j} \ln(G_{k,j}/G_0) \quad (3)$$

式中 G_0 为小信号增益, $G_{k,j}$ 为第 k 个光在第 j 段中获得的增益, $\alpha_{k,j}$ 为第 k 个光在第 j 段中的线宽加强因子, 可以表示为 $\alpha_{k,j} = -\frac{4\pi}{\lambda} \frac{dn}{dN} \frac{dg_{k,j}}{dN_j}$, 其中 $\frac{dn}{dN}$ 为微分

折射率系数^[8].

由于 SOA 的增益饱和效应, 波长为 λ_1 的高功率 NRZ 信号作为泵浦光将引起 SOA 增益和折射率的动态变化, 波长为 λ_2 的 CW 探测光从环镜的输入端口输入后首先被 3 dB 耦合器分为 cw 方向和 ccw 两路, 由于 SOA 的位置偏离环的中点, 这两路光将经历不同的增益和相位变化, 当它们绕环一周后在 3 dB 耦合器处相遇时, 将产生如下的干涉输出^[3]

$$P_{out}(t) = 4^{-1} G^{cw}(t-t_d) P_{in}(t-t_d) \{1 + G^{ccw}/G^{cw} - 2\sqrt{G^{ccw}/G^{cw}} \cos(\phi^{cw} - \phi^{ccw})\} \quad (4)$$

式中 t_d 为环的渡越时间; $G^{cw}(\phi^{cw})$ 和 $G^{ccw}(\phi^{ccw})$ 分别表示探测光的 cw 和 ccw 分支所经历的增益(相位). 式(4)表明, 当 ϕ^{cw} 和 ϕ^{ccw} 相等时环镜的输出为零; 否则环镜有输出, 且当 ϕ^{cw} 与 ϕ^{ccw} 差 π 时, 环镜输出达到最大.

3 数值模拟结果及分析

模拟中采用的 SOA 的物理参数如表 1 所示. 假定 SOA 的剩余端面反射及耦合损耗忽略不计, 注入电流 110 mA 时, 峰值增益为 25.8 dB, 峰值增益波长为 1550 nm.

表 1 模拟中采用的 SOA 的物理参数

SOA 长度(L)	500 μm	增益常数(r_1)	$7.4 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$
有源区宽度(w)	2 μm	增益常数(r_2)	$3.155 \times 10^{25} \text{ m}^{-4}$
有源区厚度(d)	0.15 μm	透明增益峰值波长(λ_1)	1.605 μm
剩余端面反射率(R_1, R_2)	0	增益峰值漂移系数(k_0)	$3 \times 10^{-32} \text{ m}^{-4}$
材料吸收系数(α)	2000 m^{-1}	载流子寿命(τ)	600 ps
透明载流子浓度(N_1)	$0.9 \times 10^{24} \text{ m}^{-3}$	材料折射率(n_g)	3.5
模场限制因子(Γ)	0.3	微分折射率系数(dn/dN)	$-1.2 \times 10^{-26} \text{ m}^3$
增益常数(a)	$2.5 \times 10^{-20} \text{ m}^2$	分段数(n)	40

3.1 工作速率为 2.5 Gb/s 时的模拟计算结果及与实验结果的比较

工作速率为 2.5 Gb/s 时的模拟计算结果如图 2 所示. 输入的 NRZ 信号由 1000, 1100, 1110, 1111 循环往复构成, 用宽度不等的超高斯脉冲模拟其波形.

计算中取携带原 NRZ 信号的泵浦光波长 λ_1 为 1545 nm, 峰值功率 0 dBm, 消光比为 10 dB, CW 探测光的波长 λ_2 为 1550 nm, 入射功率为 -9 dBm,

SOA 的注入电流取 110 mA, 探测光的 cw 和 ccw 分支到达 SOA 两端的时间差 T_d 取 200 ps, 并假定环镜输出端的滤波器是理想的. 输入 NRZ 信号的波形如图 2(a) 所示, 环镜的输出信号波形如图 2(b) 所示, 探测光的 cw (实线) 和 ccw (虚线) 分支经历的增益和相位分别如图 2(c)、(d) 所示. 计算结果显示: 由于 SOA 的 XPM 效应, 注入的高功率 NRZ 信号将引起探测光经历的增益和相位的动态变化, 在 NRZ

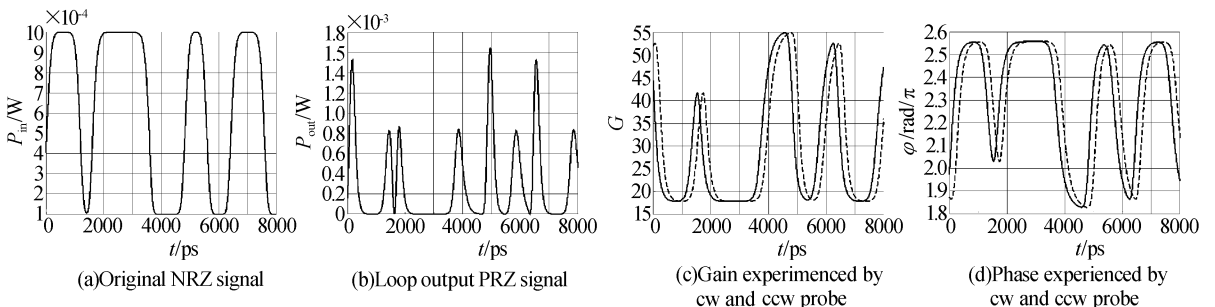


图 2 2.5 Gb/s 下的模拟计算结果

Fig. 2 Simulation results at 2.5 Gb/s

信号的上升沿增益饱和,而在下降沿到来时增益将向稳态值恢复,由于 SOA 的位置偏离环的中心,探测光的 cw 和 ccw 分支经历的增益和相位变化存在延时 T_e ,因而,在原 NRZ 信号的上升沿和下降沿均有增益和相位差产生,由式(5)知环路有输出;而且由于 cw 和 ccw 方向的增益和相位曲线存在交叉点,这时对应环路输出为零. 因此,环路的输出具有明显的 RZ 格式,如图 2(b)所示,其中的脉冲分别与原 NRZ 信号的上升沿和下降沿相对应,它所携带的数据虽然与原 NRZ 码流所携带的数据不同,但是,却具有与后者相同的时钟分量,故称为 PRZ 信号.

模拟计算结果表明:1)尽管输入 NRZ 信号具有有限的消光比,输出 NRZ 信号仍具有理想的消光比特性;2)在原 NRZ 信号的上升沿和下降沿,探测光经历的增益和相位变化的斜率不同,因而与之对应的环境输出脉冲的幅度不同,图 2(b)显示与原 NRZ 信号下降沿对应的环境输出脉冲幅度一般较小;3)由于计算中所取的 SOA 的载流子寿命大于 NRZ 信号的码元周期,环路的输出信号必然要受到码型效应的影响,如图 2(b)所示,与原 NRZ 信号上升沿对应的环境输出脉冲的幅度大小与该上升沿在码流中的位置有关,如果连“0”较少,SOA 的增益来不及恢复到稳态值下一上升沿就已到达,该上升沿引起的增益变化将小于增益恢复到稳态值后的情况.

这样的结果与我们的实验结果是一致的. 实验中环路由分立器件构成,其中 SOA 为体材料斜腔结构,最大注入电流 250 mA,峰值增益 20 dB,增益峰值波长位于 1535 ~ 1560 nm 之间,3 dB 带宽 45 nm. 2.5G SDH 分析仪 (Anritsu MP1570A) 输出的 NRZ 信号经 EDFA (Er-doped Fiber Amplifier) 放大并滤波后,作为泵浦光注入 SOA,其波长为 1545.30 nm. EXFO FLS2600B 可调谐激光光源的输出作为环路的探测光,波长的调谐范围为:1510 ~ 1610 nm,输出光功率的实际调节范围为: -13.6 ~ -3.6 dBm. 环路的输出经 EDFA 放大并滤出探测光成分后,用 Tektronix CSA8000 通信信号分析仪观察光信号的波形. SDH 分析仪的输出 NRZ 信号为 word16 循环格式,编码为 1000,1100,1110,1111.

NRZ 信号平均光功率为 2.8 dBm (图 1 中 A 点), CW 探测光的波长为 1550 nm,入射光功率为 -3.6 dBm (图 1 中 B 点), SOA 注入电流为 230 mA 时,测得滤波器后 (图 1 中 C 点) 的光信号波形如图 3(b)所示,图 3(a)为原 NRZ 信号的波形. 图 3(b)中,原 NRZ 信号连“1”处,对应的环境输出噪声较小,而原 NRZ 信号连“0”处,环路的输出噪声大. 环路输出噪声的这种动态变化可能来源于 SOA 及环路输出端 EDFA 的 ASE (Amplified Spontaneous Emission) 噪声水平随泵浦光功率的动态变化. 由于我们的模型中忽略了 ASE 噪声的影响,这一结果

在模拟结果中没有体现. 另外,原 NRZ 信号只有一个连“0”的地方前一下降沿和后一上升沿对应的环境输出脉冲之间出现重叠,这在很大程度上是由于为了消除原 NRZ 信号上升沿的过冲对输出结果的影响,启用了 CSA8000 中的 2.5 GHz 滤波器的缘故. 环路输出信号有限的消光比则起源于实验中探测光的 cw 和 ccw 分支到达 SOA 时光功率不匹配. 忽略这些因素的影响,模拟计算结果与实验结果是相当类似的,表明了所采用的模型的合理性.

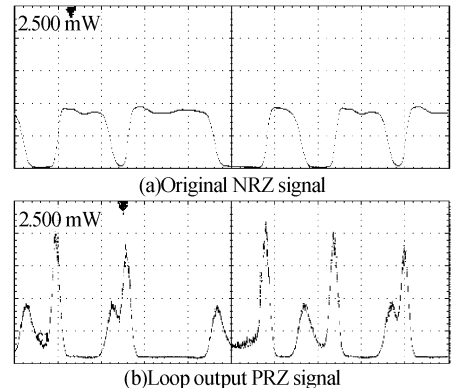


图 3 2.5 Gb/s 下的实验结果

Fig. 3 Experimental result at 2.5 Gb/s

3.2 工作速率为 10 Gb/s 时的模拟计算结果

在 2.5 G 的模拟计算中,尽管由于 SOA 载流子寿命的取值大于原 NRZ 信号的码元周期,环路的输出存在明显的码型效应,原 NRZ 信号的时钟分量还是可以通过 SOA 环路这一干涉仪结构提取出来. 本节讨论是否可以通过调整环路的工作参数,使之可以工作在更高的速率上. 图 4(a)中, NRZ 信号的速率为 10 Gb/s,泵浦光和探测光的功率以及 SOA 的注入电流与前面相同,探测光的 cw 和 ccw 分支到

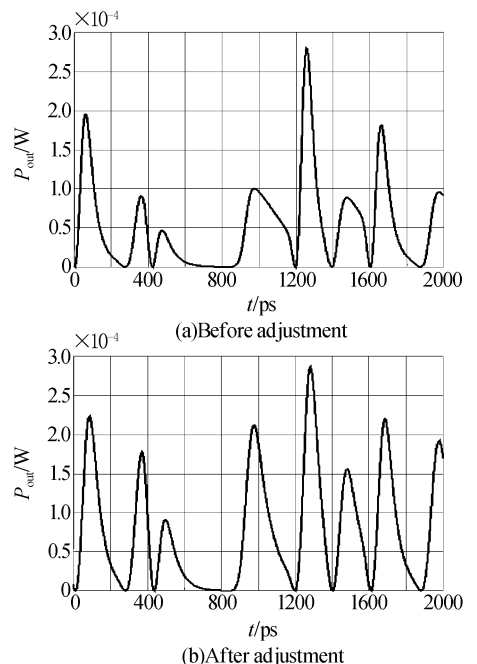


图 4 10 Gb/s 下的模拟计算结果

Fig. 4 Simulation results at 10 Gb/s

达 SOA 两端的时间差 T_e 取 50 ps, 计算结果表明, 这时环境输出的 PRZ 信号并不理想, 由于 SOA 的增益恢复时间过长(与信号码元周期相比), 当原 NRZ 信号有大于一个连“0”时, 该处连“0”之前的下降沿对应的环境输出脉冲带有明显的 NRZ 信号特征. 我们知道增加 SOA 的电流或 CW 探测光的入射功率时, 其有效载流子寿命将减小, 这对提高系统的工作速率是有利的, 其中增加 CW 探测光的入射功率时, 由于探测光引起的增益饱和, SOA 能提供的增益和增益变化将减小, 环境的输出功率将减小, 不过通过适当增加探测光的 cw 和 ccw 分支到达 SOA 两端的时间差 T_e , 可以得到一定程度的弥补. 我们将探测光的入射功率调整到 0 dBm, T_e 取 80 ps 时得到了较好的转换输出结果, 如图 4(b) 所示. 模拟计算结果表明: 通过调整环境的工作参数, 这一系统可以实现 10 Gb/s 的转换.

4 结论

NRZ 信号时钟分量的提取是实现其全光时钟恢复必不可少的环节之一. 本文对基于 SOA 光纤环境的 NRZ 信号时钟分量提取进行了数值模拟. 通过 2.5 Gb/s 下的模拟计算结果与实验结果比较, 我们认为所采用的数值模型是合理的. 数值计算和实验结果都表明, 尽管 SOA 的载流子寿命大于 NRZ 信号的码元周期, 通过 SOA 光纤环境还是可以将时钟分量提取出来, 并且模拟结果表明通过合理设置环境的工作参数, 尽管 SOA 的载流子寿命达 600 ps, 这一系统工作速率还是可以达到 10 Gb/s.

参考文献

- 1 Vlachos K, Theophilopoulos G, Hatziefremidis A, et al. 30 Gb/s all-optical clock recovery circuit. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2000, **12**(6):705 ~ 707
- 2 Kawanishi S, Saruwatari M. Ultra-high-speed PLL-type clock recovery circuit based on all-optical gain modulation in traveling-wave laser diode amplifier. *Journal of Lightwave Technology*, 1993, **11**(12):2123 ~ 2129
- 3 Eiselt M, Pieper W, Weber H G. SLALOM: Semiconductor laser amplifier in a loop mirror. *J Lightwave Technology*, 1995, **13**(10):2099 ~ 2111
- 4 Manning R J, Ellis A D, Poustie A J, et al. Semiconductor laser amplifiers for ultrafast all-optical signal processing. *J Opt Soc Am(B)*, 1997, **14**(11):3204 ~ 3216
- 5 Yao M, Tang Haiyun, Fukazawa M, et al. All-optical clock recovery from NRZ data using a nonlinear loop clock generator. *Optical Fiber Communications*, 1996, San Jose, California, USA, February 25-March 1, OFC '96, WL. 11: 177 ~ 178
- 6 Lee Hyuek Jae, Park Chang-Soo. Novel all-optical edge detector for the clock component extraction of NRZ signal using an SOA-loop-mirror. *Optics Communications*, 2000, **181**(4-6):323 ~ 326
- 7 Willner A E, Shieh W. Optical spectral and power parameters for all-optical wavelength shifting: single stage, fanout and cascability. *J Lightwave Technology*, 1995, **13**(5):771 ~ 781
- 8 Ye Yabin, Zheng Xiaoping, Zhang Hanyi, et al. Study on the dynamic range of input power for wavelength converter based on cross-phase modulation in SOAs. *Optics Communications*, 2001, **200**(1-6):349 ~ 354

Numerical Simulation of Clock Component Extraction of NRZ Signal Using SOA Loop Mirror

Hong Wei, Huang Dexiu

Department of Optoelectronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, China 430074

Received date: 2003-02-24

Abstract Clock component extraction of NRZ (Non-return-to-zero) signal based on SOA (semiconductor optical amplifier) loop mirror was numerically simulated using a multi-section model of SOA. The original NRZ signal can be converted to the corresponding PRZ (Pseudo-return-to-zero) signal that contains the same clock component. Simulation result of 2.5 Gb/s operation was given and was compared to the experimental result. Simulation result of 10 Gb/s operation was also given.

Keywords SOA (Semiconductor optical amplifier); SOA loop mirror; Clock component extraction; NRZ (Non-return-to-zero); PRZ (Pseudo-return-to-zero)



Hong Wei was born in 1974, in Anhui Province, China. She received the M. Sc. degree from Huazhong University of Science and Technology (HUST), Wuhan, in 1996. She is currently working toward the Ph. D. degree in the Department of Optoelectronic Engineering. Her field of interest is optical amplifiers and their applications in optical networks.