

# 基于折叠式超快非线性干涉仪的全光码型转换理论和实验研究\*

李 达 张新亮† 黄德修

(华中科技大学光电子与信息学院, 武汉 430074)

(华中科技大学光电子科学与工程学院, 武汉 430074)

(2006 年 7 月 1 日收到, 2006 年 11 月 15 日收到修改稿)

码型转换是实现非归零(NRZ)信号全光时钟恢复的关键技术. 提出了一种基于折叠式超快非线性干涉仪的全光 NRZ 到伪归零(PRZ)信号转换的新型方案. 基于半导体光放大器的分段模型和超快非线性干涉仪的传输函数, 建立了该方案的理论分析模型, 数值模拟了不同速率下的码型转换过程. 实验实现了稳定的 10、20 和 40 Gbit/s 的 NRZ 到 PRZ 信号的码型转换, 分析了影响码型转换输出特性的因素. 理论分析结果与实验结果基本符合.

关键词: 超快非线性干涉仪, 半导体光放大器, 全光码型转换

PACC: 4265G, 4255P, 4280S

## 1. 引 言

全光时钟恢复是全光 3R 再生(再放大、再整形、再定时)的关键技术. 实现全光时钟恢复的方法有很多种, 但多数是基于归零(RZ)信号的时钟恢复<sup>[1]</sup>, 因为 RZ 信号中含有较强的时钟分量. 非归零(NRZ)信号中不含有离散的时钟分量, 直接提取时钟信号比较困难, 通常先将其转换成伪归零(PRZ)信号. 目前实现 NRZ 信号时钟恢复的方案主要有两种: 一种是基于半导体光放大器(SOA)或法布里-珀罗半导体激光器的自相位调制效应<sup>[2,3]</sup>, 另一种是干涉仪型光开关<sup>[4-6]</sup>. 利用自相位调制效应提取 NRZ 信号的时钟分量结构简单, 但处理信号的带宽受到 SOA 增益恢复时间的限制<sup>[2]</sup>. 超快非线性干涉仪(UNI)<sup>[7,8]</sup>作为一种新型的全光逻辑器件, 采用单臂型的干涉仪结构, 相比于其他干涉仪型光开关性能更加稳定.

本文提出了利用折叠型 UNI 实现 NRZ 信号到 PRZ 信号的全光码型转换, 该方案具有结构简单、性能稳定、可转换速率高等优点. 同时建立了相

应的理论分析模型, 实验实现了 10—40 Gbit/s 的全光码型转换, 并讨论了输入光特性对码型转换的影响.

## 2. 方案概述

折叠型 UNI 的实验结构如图 1 所示. 图 1 中的偏振控制器 1 用来控制注入信号光偏振方向与保偏光纤(PMF)快慢轴的夹角, 一般取为 45°, 使得信号光经过 PMF 后分离成两个振幅相等、偏振方向正交的分量, 偏振方向分别对应于 PMF 的快慢轴. 实验中, PMF 引起的群延时必须小于原始 NRZ 信号的码元周期. 由于 SOA 动态增益特性的影响, 信号光两正交分量在不同时刻经过 SOA 后, 所经受的功率增益以及非线性相移不同. 环路中的偏振控制器 2 用来交换两分量的偏振方向, 使得两分量返回通过 PMF 后在时域上重新复合, 并在输出端的检偏器上实现干涉输出. 调节检偏器的出光方向, 使得系统工作在“异或门”的状态, 此时输出脉冲分别对应原始 NRZ 信号的上升沿或下降沿, 即得到的是 PRZ 信号.

\* 国家自然科学基金(批准号: 60407001)、湖北省杰出青年基金(批准号: 2006ABB017)和教育部新世纪优秀人才支持计划(批准号: NCET-04-0715)资助的课题.

† E-mail: xlzhang@mail.hust.edu.cn

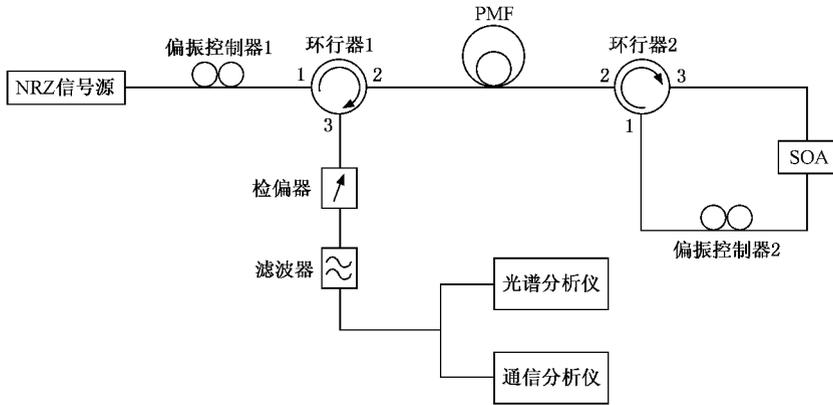


图 1 折叠型 UNI 实验结构示意图

### 3. 理论模型

#### 3.1. SOA 动态特性分析

SOA 是 UNI 的核心器件,起着非线性介质的作用.忽略三阶非线性效应和放大自发辐射噪声影响时,SOA 内部载流子浓度的速率方程和光脉冲在 SOA 中的基本传输方程可由下式描述<sup>[9-12]</sup>:

$$\frac{\partial N(z, t)}{\partial t} = \frac{I}{eV} - R(N) - \frac{\Gamma g(N)P(z, t)}{h\nu A}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial P(z, t)}{\partial z} = P(z, t) [\Gamma g(N) - \alpha_{int}], \quad (2)$$

式中  $I$  为 SOA 的偏置电流,  $e$  为电子基本电量,  $V$  为有源区体积,  $N(z, t)$  表示某时刻 SOA 中  $z$  处的载流子浓度,  $h\nu$  为对应信号光波长的光子能量,  $A$  为有源区横截面的面积,  $\Gamma$  为模场限制因子,  $R(N)$  为自发辐射复合和非辐射复合引起的载流子消耗,  $g(N)$  为材料增益系数,  $\alpha_{int}$  为 SOA 的内部损耗系数.

(1)和(2)式可以较完备地描述 SOA 的动态增益特性.由于 SOA 有源区内部载流子分布的不均匀性,为了准确模拟光脉冲在 SOA 内部的传播情况,通常采用分段模型<sup>[9,10]</sup>来进行数值模拟.如图 2 所示,将有源区长为  $L$  的 SOA 均匀地分成  $M$  小段,每段长度为

$$\Delta z = \frac{L}{M},$$

光信号在每段的传输时间为

$$\Delta t = \frac{\Delta z}{V_g}.$$

可以近似地认为每一小段内部载流子浓度沿长度方

向是均匀分布的,则 SOA 中第  $k$  子段的载流子速率方程和端面功率传输方程可以表示为

$$\frac{dN_k(t)}{dt} = \frac{I}{eV} - R(N_k) - \frac{\Gamma g(N_k)P_k(t)}{h\nu A}, \quad (3)$$

$$P_{k+1}(t) = P_k(t - \Delta t) \exp[\Gamma g(N_k) - \alpha_{int} \Delta z], \quad (4)$$

式中  $P_k(t)$  为信号光在第  $k$  段中的平均光功率.利用经典四级四阶龙格-库塔法求解方程(3)(4),可以算出输入光功率变化引起的有源区载流子浓度的变化,继而算出 SOA 的单程功率增益随时间的变化情况.

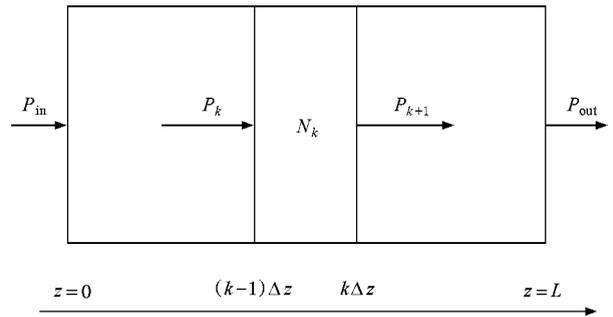


图 2 SOA 分段模型示意图

#### 3.2. UNI 传输特性分析

利用琼斯矩阵分析 UNI 的传输特性,忽略信号光在光纤中传输时自相位调制效应的影响,可以推导出 UNI 传输函数的一般形式<sup>[7,8]</sup>,即

$$H = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \sin^2(\theta - \beta) \sin^2 \theta \alpha(t) + \cos^2(\theta - \beta) \cos^2 \theta \alpha(t - \Delta\tau) + \frac{1}{2} \sqrt{\alpha(t - \Delta\tau)} \sqrt{\alpha(t)} \sin 2\theta$$

$$\times \sin 2(\theta - \beta) \cos \Delta \Phi(t), \quad (5)$$

式中  $\theta$  为入射光的偏振方向与 PMF 快轴的夹角,  $\beta$  为检偏器的出光方向与入射光偏振方向的夹角,  $\alpha(t - \Delta\tau)$  和  $\alpha(t)$  分别对应沿 PMF 快、慢轴方向偏振的信号光两分量经过 SOA 时所受到的单程功率增益,  $\Delta\Phi(t)$  为信号光两偏振分量经过 SOA 时的附加相移. 忽略三阶非线性效应时, SOA 引起的非线性相移可近似表示为<sup>[12]</sup>

$$\frac{\partial \Phi}{\partial z} = -\frac{1}{2} \alpha g(N), \quad (6)$$

式中  $\alpha$  为线宽增强因子,  $g(N)$  为 SOA 的材料增益系数. 对(6)式沿 SOA 长度积分求得  $\Phi(t)$ , 可以近似认为两分量信号通过 SOA 时所遇到的相位差

$$\begin{aligned} \Delta \Phi(t) &= \Phi(t) - \Phi(t - \Delta\tau) \\ &= -\frac{\alpha}{2} \ln \left[ \frac{\alpha(t)}{\alpha(t - \Delta\tau)} \right]. \end{aligned} \quad (7)$$

将(7)式代入(5)式, 可以得到 UNI 的传输函数

$$\begin{aligned} H &= \sin^2(\theta - \beta) \sin^2 \theta \alpha(t) \\ &+ \cos^2(\theta - \beta) \cos^2 \theta \alpha(t - \Delta\tau) \\ &+ \frac{1}{2} \sqrt{\alpha(t - \Delta\tau)} \sqrt{\alpha(t)} \sin 2\theta \\ &\times \sin 2(\theta - \beta) \cos \left[ \frac{\alpha}{2} \ln \frac{\alpha(t)}{\alpha(t - \Delta\tau)} \right]. \end{aligned} \quad (8)$$

由(8)式可知: UNI 的传输特性与入射光进入 PMF 的角度  $\theta$  及检偏器偏离起偏器的角度  $\beta$  有关, 调整  $\beta$  的大小, 可以得到不同的正相输出或反相输出结果; UNI 的传输特性与两偏振分量经过 SOA 时经受的不同增益和相位也有很大关系, 即 UNI 的开关特性是交叉增益调制和交叉相位调制共同作用的结果.

## 4. 结果及讨论

### 4.1. 数值模拟

利用上述 SOA-UNI 的理论模型, 对不同速率下 NRZ 信号到 PRZ 信号的码型转换进行了数值模拟. 输入的 NRZ 信号为不同速率的比特序列 "1000110011101111". 模拟时, 取 PMF 引起的群延时为  $\Delta\tau = 20$  ps, 入射光偏振方向和 PMF 快轴的夹角  $\theta = 45^\circ$ , 检偏器与起偏器的夹角  $\beta = 90^\circ$ . 此时, UNI 的传输函数可以简化为

$$H = \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{in}}} = \frac{1}{4} \{ \alpha(t) + \alpha(t - \Delta\tau) - 2\sqrt{\alpha(t)}\sqrt{\alpha(t - \Delta\tau)} \times \cos \left[ \frac{\alpha}{2} \ln \frac{\alpha(t)}{\alpha(t - \Delta\tau)} \right] \}. \quad (9)$$

图 3 是 10—40 Gbit/s 的 NRZ 信号到 PRZ 信号的转换结果. 由图 3 可以看出, 原始 NRZ 信号中连 "1" 的上升沿对应脉冲输出, 而下降沿对应输出脉冲的幅值较小. 由于 SOA 的动态增益特性, NRZ 信号两分量的上升沿和下降沿之间均存在增益和相位

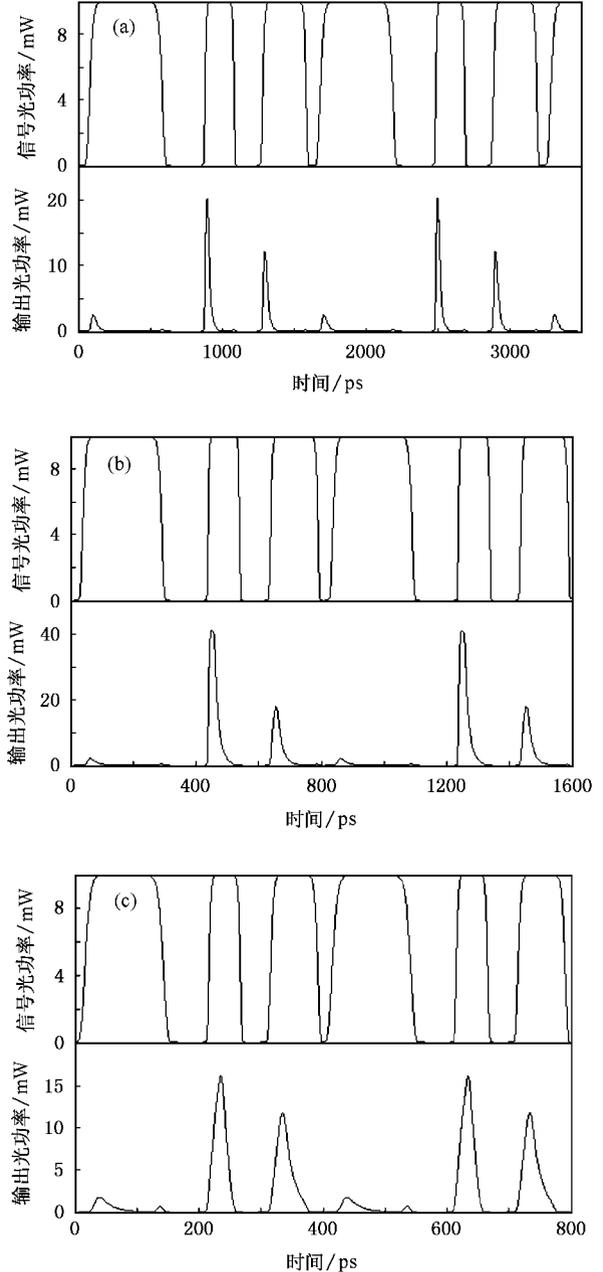


图 3 不同速率 NRZ 信号码型转换的模拟结果. 编码格式为 "1000110011101111". (a) 10 Gbit/s (b) 20 Gbit/s (c) 40 Gbit/s. 图中信号光波形对应原始 NRZ 信号, 输出光波形对应输出的 PRZ 信号.

差,由 UNI 的传输函数(9)式可知有对应的脉冲输出. SOA 的增益特性受到信号调制时,脉冲的上升沿对应于 SOA 增益饱和的过程,脉冲下降沿对应于 SOA 增益恢复的过程,由于增益饱和时的变化斜率要比增益恢复时大得多,所以上升沿对应的输出脉冲比下降沿对应的输出脉冲更为显著.

由图 3 还可以看出,输出结果中码型效应较为严重,即原始 NRZ 信号中不同长度的连“1”对应的输出脉冲峰值不同. 观察不同速率下的 PRZ 输出可知,PRZ 信号中各个主脉冲(原始 NRZ 信号上升沿对应的输出脉冲)的宽度约为 20—30 ps. 这是因为 UNI 的开关宽度由 PMF 引起的群延时所决定<sup>[7,8]</sup>(模拟中取为 20ps).

### 4.2. 实验结果

实验中所用 PMF 引起的群延时为 18.5 ps,小于 40 Gbit/s 的 NRZ 信号码元周期 25 ps. 输入的 NRZ 信号有两种编码格式:固定编码“1000110011101111”和

31 位伪随机编码.

图 4—图 6 是利用上述实验装置实现速率为 10—40 Gbit/s 的全光码型转换结果,每幅图中上面波形为输入的 NRZ 信号,下面波形为输出的 PRZ 信号. 由实验结果可知,原始 NRZ 信号的上升沿和下降沿都对应脉冲输出,与数值模拟的结果基本符合. 信号速率较低(10 和 20 Gbit/s)时,上升沿对应的输出脉冲幅值远大于下降沿对应的输出脉冲. 信号速率较高(40 Gbit/s)时,原始信号上升沿和下降沿对应输出脉冲的幅值相差不大. 这是因为原始信号比特周期很小(25 ps),SOA 增益饱和及恢复都不充分,两个阶段中 SOA 增益变化的斜率相差不大,导致输出的 PRZ 信号中上升沿和下降沿对应的输出脉冲相差不大. 从实验结果也能观察到码型效应的影响,原始 NRZ 信号中不同长度连“1”的上升沿对应输出脉冲幅值不同.

PRZ 信号眼图的每个周期都可以观察到两个“眼”,导致这种现象的因素有两个:一是码型效应的

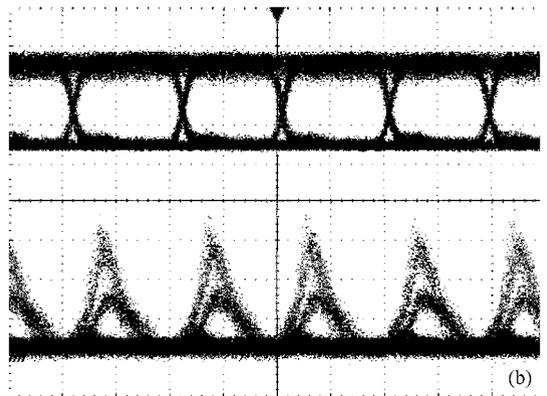


图 4 10Gbit/s 的码型转换结果 (a)输入 NRZ 信号为固定编码格式“1000110011101111”(b)输入 NRZ 信号为 31 位伪随机编码

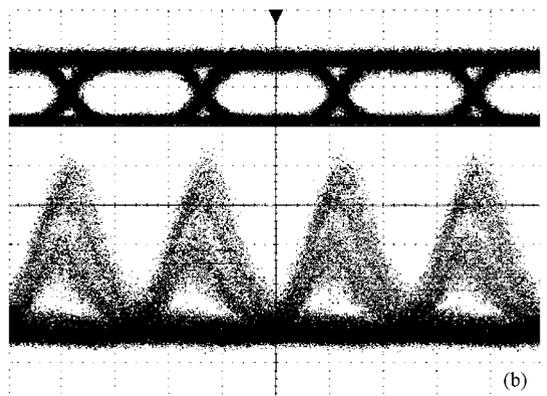
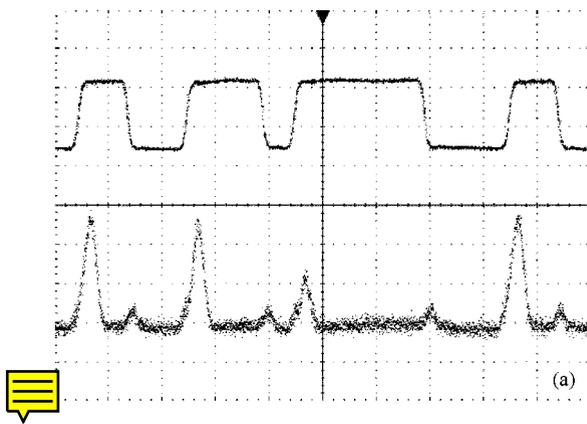


图 5 20 Gbit/s 的码型转换结果 (a)输入 NRZ 信号为固定编码格式“1000110011101111”(b)输入 NRZ 信号为 31 位伪随机编码

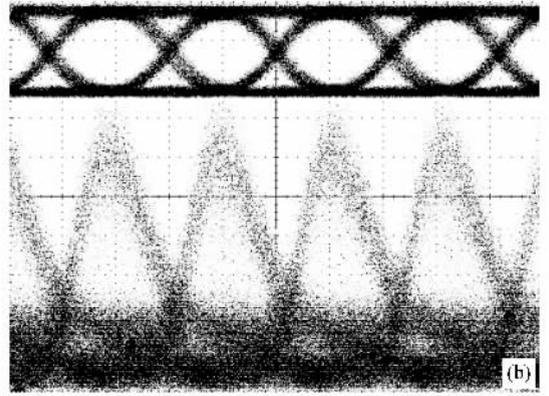
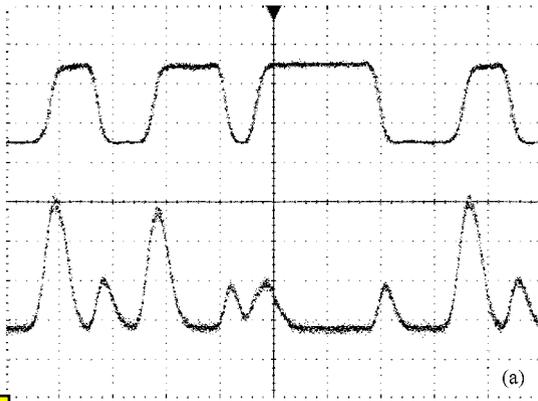


图6 40 Gbit/s的码型转换结果 (a)输入 NRZ 信号为固定编码格式“1000110011101111”(b)输入 NRZ 信号为 31 位伪随机编码

影响,二是对应于原始 NRZ 信号的上升沿和下降沿都有输出脉冲.比较不同速率下输出的 PRZ 信号眼图可知,眼图张开的半宽都约为 20 ps 左右,与实验中所使用的 PMF 引起的群延时(18.5 ps)接近,与以上理论分析相符合.若 PMF 引起的群延时越小(使用更短的 PMF),UNI 的开关宽度也越小,则能实现更高速率的码型转换.

需要特别指出的是,输入信号光的功率对码型转换的结果有很大影响.当输入信号光功率过大时,SOA 增益饱和很深,码型效应更为严重.当输入信号光功率过小时,原始信号对 SOA 增益调制作用并不明显,导致 UNI 的开关作用可以忽略不计,并不能实现码型转换.因此,适当调整输入信号光功率可以得到较为理想的码型转换输出.

以上理论模拟和实验研究都验证了采用 UNI 可以实现全光码型转换的功能.由于该方案基于 UNI 的开关效应,因此合理选择工作条件,如选取群延时更小的 PMF,有望实现更高速率的码型转换.

## 5. 结 论

本文提出了一种基于折叠式 UNI 的新型全光码型转换方案,建立了相应的理论分析模型,研究了 NRZ 信号到 PRZ 信号的转换特性.实现了 10—40 Gbit/s 的全光码型转换,并得到了稳定的输出眼图,理论计算结果和实验结果能很好相符.该方案具有消光比高、性能稳定、可转换速率高等优点,具有进一步研究的价值.

- [1] Yang Y, Wen Y J, Nirmalathas A *et al* 2004 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **16** 1561
- [2] Lee H J, Kim H G, Choi J Y *et al* 1999 *Electron. Lett.* **35** 989
- [3] Jeong Y D, Lee H J, Yoo H *et al* 2004 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **16** 1179
- [4] Lee H K, Kim K H, Ahn J T *et al* 1996 *Electron. Lett.* **32** 2335
- [5] Hong W, Huang D X, Cai F B *et al* 2004 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **16** 1116
- [6] Xu L, Wang B C, Baby V *et al* 2003 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **15** 308
- [7] Chen X Z, Yao M Y, Gao Y Z 1999 *J. Optoelectron. Laser* **10** 388 (in Chinese)[陈兴忠、姚敏玉、高以智 1999 光电子·激光 **10**

- 388]
- [8] Wang Z R, Yu J L, Wang X B *et al* 2005 *Chin. J. Lasers* **32** 987 (in Chinese)[王卓然、于晋龙、王新兵等 2005 中国激光 **32** 987]
- [9] Wang Y, Zhang X L, Huang D X 2003 *Chin. Phys.* **13** 882
- [10] Zhang X L, Dong J J, Wang Y *et al* 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 2066 (in Chinese)[张新亮、董建绩、王颖等 2005 物理学报 **54** 2066]
- [11] Dong J J, Zhang X L, Huang D X 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 763 (in Chinese)[董建绩、张新亮、黄德修 2005 物理学报 **54** 763]
- [12] Agrawal G P, Olsson N A 1989 *IEEE J. Quantum Electron.* **25** 2297

# Experimental and theoretical investigation on novel all-optical format conversion based on a folded ultrafast nonlinear interferometer<sup>\*</sup>

Li Da Zhang Xin-Liang<sup>†</sup> Huang De-Xiu

( *Institute of Optoelectronics and Information , Huazhong University of Science and Technology , Wuhan 430074 , China* )

( *Institute of Optoelectronics Science and Technology , Huazhong University of Science and Technology , Wuhan 430074 , China* )

( Received 1 July 2006 ; revised manuscript received 15 November 2006 )

## Abstract

Pattern conversion is the key technology for all-optical clock recovery from non-return-to-zero( NRZ )signal . A novel scheme for all-optical NRZ to pseudo-return-to-zero( PRZ )conversion using a folded ultrafast nonlinear interferometer( UNI ) has been put forward and demonstrated for the first time . Based on the segmented semiconductor optical amplifier model and the transmittance of the UNI , theoretical model for this scheme is established and the output characteristics are calculated theoretically . Stable format conversion from NRZ data to PRZ data has been achieved at 10 , 20 and 40 Gbit/s . The influences of the input signal characteristics on the performance of the format conversion are investigated . Experimental results are in agreement with the numerical simulation results .

**Keywords** : ultrafast nonlinear interferometer , semiconductor optical amplifier , all-optical data format conversion

**PACC** : 4265G , 4255P , 4280S

<sup>\*</sup> Project supported by the National Natural Science Foundation of China ( Grant No. 60407001 ) , the Outstanding Youth Foundation of Hubei Province , China ( Grant No. 2006ABB017 ) and the Program for the New Century Excellent Talents in University of Ministry of Education , China ( Grant No. NCET-04-0715 ) .

<sup>†</sup> E-mail : xlzhang@mail.hust.edu.cn