

# 基于硅光波导非线性效应的非归零码到归零码 光调制格式转换

张博琳 宋牟平

(浙江大学信息与电子工程学系, 浙江 杭州 310027)

**摘要** 基于硅光波导的四波混频(FWM)和交叉相位调制(XPM)效应,提出非归零码(NRZ)到归零码(RZ)的光调制格式转换。当探测光 NRZ 信号和抽运光时钟脉冲序列同步通过硅波导时,FWM 效应产生斯托克斯光和反斯托克斯光,XPM 效应使探测光频谱产生红移和蓝移,选择合适的带通滤波器(OBPF)可得到四种 RZ 信号。分析了斯托克斯光和反斯托克斯光的功率与探测光和抽运光功率的关系,四种 RZ 信号的脉宽与抽运光脉宽的关系,抽运光对探测光的波长失谐量对四种 RZ 信号转换效率的影响等。此外,抽运光脉宽的大小影响 XPM 效应产生的 RZ 信号的质量:当抽运光脉宽为 2~15 ps 时,可产生四种高质量的 RZ 信号;当抽运光脉宽大于 15 ps 时,探测光蓝移频谱中提取出的 RZ 信号质量很差。

**关键词** 光通信;调制格式转换;硅光波导;四波混频;交叉相位调制

**中图分类号** TN929.11 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL201138.s105003

## Optical NRZ-to-RZ Modulation Format Conversion Based on Nonlinear Effects in Silicon Optical Waveguide

Zhang Bolin Song Muping

(Department of Information Science and Electronic Engineering, Zhejiang University,  
Hangzhou, Zhejiang 310027, China)

**Abstract** A format conversion from a non-return-to-zero (NRZ) signal to return-to-zero (RZ) signal is presented based on four-wave mixing (FWM) and cross-phase modulation (XPM) in a silicon optical waveguide. When a NRZ signal acting as the probe and a periodic pulse train as the pump are launched into the silicon waveguide synchronously, the Stokes and anti-Stokes are generated by FWM and the red and blue shifts are induced by XPM in the probe spectrum. Four RZ signals can be then extracted by utilizing appropriate optical bandpass filters (OBPF). The power variations in the Stokes and anti-Stokes due to the change of pump and probe power, the relation between four RZ signal pulse widths and pump pulse width, and the influence of the wavelength detuning of pump to probe on the conversion efficiency etc. are investigated. Furthermore, the pump pulse width affects the qualities of XPM-induced RZ signals. When the pump pulse width ranges from 2 to 15 ps, four high-quality RZ signals can be obtained. And when the pulse width is larger than 15 ps, the RZ signal filtered from blue shift spectrum of the probe is of bad quality.

**Key words** optical communications; modulation format conversion; silicon optical waveguide; four-wave mixing; cross-phase modulation

**OCIS codes** 060.1155; 070.4560; 070.4340

## 1 引 言

硅基绝缘(SOI)材料是一种新型的硅基光电子

材料,是近年来一种很热门的光子集成技术,其制作工艺与微电子标准 CMOS 工艺兼容性好,能实现与

**收稿日期:** 2011-07-15; **收到修改稿日期:** 2011-09-02

**作者简介:** 张博琳(1988—),女,硕士研究生,主要从事硅光子器件、光纤通信等方面的研究。

E-mail: 20931021@zju.edu.cn

**导师简介:** 宋牟平(1971—),男,博士,副教授,主要从事光子器件、光纤通信/传感等方面的研究。

E-mail: songmp@zju.edu.cn(通信联系人)

硅基微电子电路的单片集成。在 SOI 材料基础上以 Si( $n=3.45$ ) 作为芯层, SiO<sub>2</sub> ( $n=1.45$ ) 作为包层, 可制作出截面尺寸在亚波长量级的硅光波导<sup>[1]</sup>。高折射率差( $\Delta n=2$ ) 的硅光波导对光场有很强的限制作用, 为硅光波导的小型化和高密度集成化提供了前提条件; 此外, 硅波导中传输的光功率密度可以达到传统单模光纤的 1000 倍以上, 输入光功率值较低时也会产生显著的光学非线性效应, 如受激拉曼散射(SRS)、受激布里渊散射(SBS)、自相位调制(SPM)、交叉相位调制(XPM)、四波混频(FWM)和双光子吸收(TPA)等。

非归零码(NRZ)和归零码(RZ)是光通信系统中最常见的两种光调制格式。NRZ 调制格式具有谱宽窄、对时间抖动容忍度大等优点, 应用于速率相对较低的光通信系统中。而 RZ 调制格式的平均光功率低, 对光纤非线性和偏振模色散(PMD)的容忍度高, 且有利于时钟恢复<sup>[2]</sup>。因此 NRZ 和 RZ 之间的光调制格式转换将成为未来光网络的一个重要技术。

目前已有多种基于非线性效应实现 NRZ 到 RZ 的转换方案, 如基于半导体光放大器(SOA)的交叉增益调制(XGM)效应<sup>[3]</sup>、XPM 效应<sup>[4]</sup>或者 FWM 效应<sup>[5]</sup>, 基于非线性光纤的 XPM 效应<sup>[6]</sup>或者 FWM 效应<sup>[7,8]</sup>, 基于硅光波导的 XPM 或者 FWM 效应<sup>[9]</sup>等。然而 SOA 是有源器件, 需要电流注入和热沉组件; 而作为无源器件的非线性光纤, 它的非线性系数较低, 要完成光调制转换需要很长的光纤, 成本较高。

本文研究利用硅光波导的 XPM 和 FWM 效应实现 NRZ 信号到 RZ 信号的调制格式转换。FWM 效应产生两个新频率的光波, 即斯托克斯光和反斯托克斯光, XPM 效应使探测光 NRZ 信号的频谱产生红移和蓝移, 选择合适的带通滤波器(OBPF)可得到这四种 RZ 信号。本文对比了这四种 RZ 信号的脉宽、转换效率和模式效应等。

## 2 工作原理

图 1 是基于硅光波导非线性效应实现 NRZ 到 RZ 光调制格式转换的系统框图。其中硅光波导参数为: 长 5 mm, 有效场面积  $A_{\text{eff}}=0.11 \mu\text{m}^2$ , 线性损耗系数  $\alpha=3.7 \text{ dB/cm}$ <sup>[10]</sup>, 非线性折射率系数  $n_2=8 \times 10^{-18} \text{ m}^2/\text{W}$ 。硅光波导中的总色散系数  $\beta_2 \approx 0.0022 \text{ ps}^2/\text{nm}$ , 因此这里忽略硅波导中色散的作用。抽运光  $S_p$  采用 10 GHz 的时钟脉冲序列, 对应的中心频率是  $\nu_p$ , 探测光  $S_s$  采用 NRZ-OOK 信号, 对应的中心频率为  $\nu_s$ 。其工作原理如图 2 所示, 调

整抽运光使其与探测光同步, 并将两束光同时输入到硅光波导中, 利用硅光波导的 FWM 和 XPM 非线性效应来实现 NRZ 到 RZ 光调制格式转换:

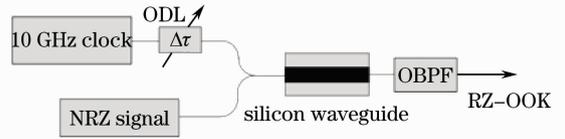


图 1 基于硅光波导实现 NRZ 到 RZ 光调制格式转换的系统框图

Fig. 1 System block diagram of NRZ-to-RZ optical format modulation conversion based on silicon optical waveguide

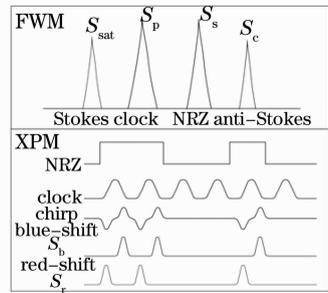


图 2 基于硅光波导 FWM 和 XPM 效应实现 NRZ 信号到 RZ 信号转换的原理图

Fig. 2 Schematic diagram of NRZ-to-RZ optical format conversion based on FWM and XPM effects in silicon optical waveguide

1) FWM——当抽运光和探测光满足相位匹配时会发生 FWM 效应, 它表现为在光谱的两个边带处产生两个新频率的光波, 分别为斯托克斯光  $S_{\text{sat}}$  (中心频率  $\nu_{\text{sat}}=2\nu_p-\nu_s$ ) 和反斯托克斯光  $S_c$  (中心频率  $\nu_c=2\nu_s-\nu_p$ ), 且这两个新产生的光波会携带输入光的调制信息。该过程可以用抽运光和探测光通过“与门”来描述, 当探测光 NRZ 码为“1”时, 输出信号为“1”; 当 NRZ 码为“0”时, 输出信号为“0”, 从而 NRZ 码到 RZ 码的转换得到实现。设置 OBPF 的中心频率分别位于  $\nu_{\text{sat}}$  和  $\nu_c$  处, 并选择合适带宽, 得到的  $S_{\text{sat}}$  和  $S_c$  信号是上述两种 RZ 信号。

2) XPM——在硅光波导 XPM 效应下, 抽运光脉冲前沿附近的频率啁啾为负, 且探测光频谱产生红移现象; 抽运光脉冲后沿附近的频率啁啾为正, 且探测光频谱移向蓝端, 此时探测光频谱发生展宽。合适的 OBPF 只能传输发生感应频移的成分, 从而另外两种 RZ 信号  $S_b$  和  $S_r$  分别从探测光展宽频谱的红移和蓝移处提取出来, 该过程同样也可以用“与门”描述。

抽运光和探测光在硅光波导里发生非线性效应

的过程可以用下列非线性方程表示<sup>[11]</sup>：

$$\frac{\partial A_p}{\partial z} = -\frac{\alpha}{2}A_p - i\frac{\beta_2}{2}\frac{\partial^2 A_p}{\partial t^2} + i\beta^f A_p + \left(i\gamma_p - \frac{\beta_{TPA}}{2A_{eff}}\right)(|A_p|^2 + 2|A_s|^2 + 2|A_c|^2 + 2|A_{sat}|^2)A_p + i\gamma_p A_s^2 A_{sat}^* + 2i\gamma_p A_s A_c A_p^*, \quad (1)$$

$$\frac{\partial A_s}{\partial z} = -\frac{\alpha}{2}A_s - i\frac{\beta_2}{2}\frac{\partial^2 A_s}{\partial t^2} + i\beta^f A_s + \left(i\gamma_s - \frac{\beta_{TPA}}{2A_{eff}}\right)(|A_s|^2 + 2|A_p|^2 + 2|A_c|^2 + 2|A_{sat}|^2)A_s + i\gamma_s A_p^2 A_c^* + 2i\gamma_s A_p A_{sat} A_s^*, \quad (2)$$

$$\frac{\partial A_{sat}}{\partial z} = -\frac{\alpha}{2}A_{sat} - i\frac{\beta_2}{2}\frac{\partial^2 A_{sat}}{\partial t^2} + i\beta^f A_{sat} + \left(i\gamma_{sat} - \frac{\beta_{TPA}}{2A_{eff}}\right)(|A_{sat}|^2 + 2|A_p|^2 + 2|A_s|^2 + 2|A_c|^2)A_{sat} + i\gamma_{sat} A_s^2 A_p^* + 2i\gamma_{sat} A_s A_p A_c^*, \quad (3)$$

$$\frac{\partial A_c}{\partial z} = -\frac{\alpha}{2}A_c - i\frac{\beta_2}{2}\frac{\partial^2 A_c}{\partial t^2} + i\beta^f A_c + \left(i\gamma_c - \frac{\beta_{TPA}}{2A_{eff}}\right)(|A_c|^2 + 2|A_p|^2 + 2|A_s|^2 + 2|A_{sat}|^2)A_c + i\gamma_c A_p^2 A_s^* + 2i\gamma_c A_p A_s A_{sat}^*, \quad (4)$$

$$\gamma_i = \frac{n_2 \omega_i}{c A_{eff}}, (i = p, s, sat, c), \quad (5)$$

式中  $A_p$ 、 $A_s$ 、 $A_{sat}$  和  $A_c$  分别表示抽运光、探测光、斯托克斯光和反斯托克斯光的幅度， $\gamma_i$  是非线性系数， $\beta_{TPA} = 5 \times 10^{-12}$  m/W 是非线性 TPA 系数；参数  $\beta^f$  反映自由载流子效应，包括自由载流子吸收(FCA)和自由载流子色散(FCD)，且和 TPA 引起的自由载流子密度  $N$  密切相关<sup>[12,13]</sup>

$$\beta^f = \frac{n_0}{n_{eff}}[-(8.8 \times 10^{-4}N + 8.5N^{0.8})k_0 + i7.25N] \times 10^{-18}, \quad (6)$$

$$\frac{\partial N(z, t)}{\partial t} = \frac{\beta_{TPA}}{2\hbar\nu_0}(|A_p(z, t)|^2 + |A_s(z, t)|^2 + |A_{sat}(z, t)|^2 + |A_c(z, t)|^2) - \frac{N(z, t)}{\tau_c}. \quad (7)$$

式中  $n_0 = 3.48$ <sup>[14]</sup> 是材料的折射系数， $n_{eff} = 2.76$  是硅光波导的有效折射系数， $\tau_c = 1.5$  ns<sup>[15]</sup> 是自由载流子寿命。

### 3 实验结果

抽运光的中心频率  $\nu_p$  为 192.98 THz(中心波长  $\lambda_p$  为 1553.5 nm)、平均功率为 65 mW(18 dBm)，取一阶高斯脉冲脉宽为 7 ps，相邻两脉冲间间隔为 100 ps；探测光 NRZ 信号的中心频率  $\nu_s$  为 194.67 THz(中心

波长  $\lambda_s$  为 1540 nm)，功率为 40 mW(16 dBm)。当抽运光和探测光经过硅光波导的 FWM 和 XPM 效应后得到的输出信号如图 3(a)所示。由于抽运光对探测光、斯托克斯光和反斯托克斯光的 XPM 效应，导致它们的频谱都发生展宽，而抽运光自身发生 SPM 效应，

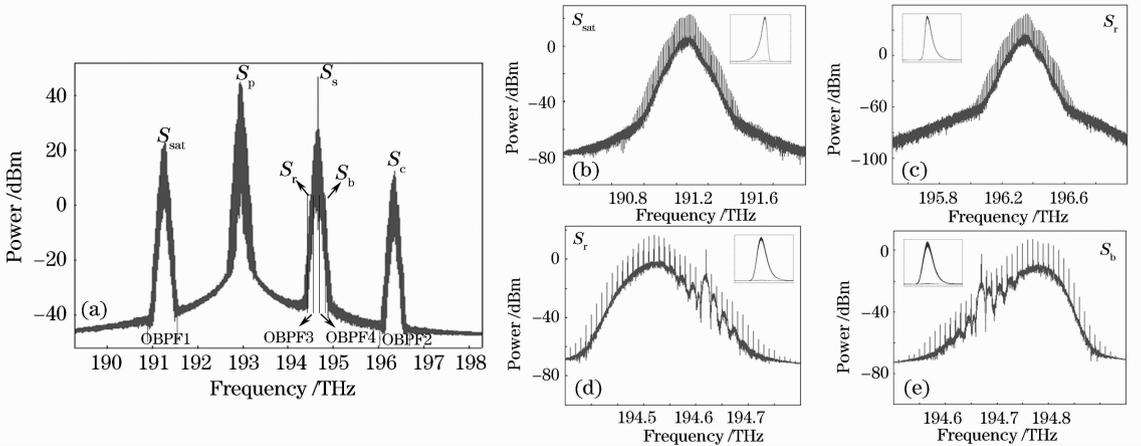


图 3 OBPF 的输入输出频谱图和眼图。(a) OBPF 的输入频谱图；(b) OBPF1 输出的  $S_{sat}$  信号；(c) OBPF2 输出的  $S_c$  信号；(d) OBPF3 输出的  $S_r$  信号；(e) OBPF4 输出的  $S_b$  信号

Fig. 3 Input and output spectra and eye diagrams of OBPF. (a) Input spectrum of OBPF; (b) output signal  $S_{sat}$  from OBPF1; (c) output signal  $S_c$  from OBPF2; (d) output signal  $S_r$  from OBPF3; (e) output signal  $S_b$  from OBPF4

它的频谱也有一定程度的展宽。此时的抽运光功率较小, TPA 效应不明显, 产生的自由载流子数量较少, 从而忽略 TPA 和自由载流子对输出光频谱的影响。这里取 OBPF1 和 OBPF2 的中心频率分别为  $\nu_{\text{sat}}=191.29$  THz 和  $\nu_c=196.36$  THz, 带宽均为 4 nm, 得到  $S_{\text{sat}}$  信号和  $S_c$  信号的频谱图和眼图分别如图 3(b)、(c) 所示; 取 OBPF3 和 OBPF4 的中心波长分别为 1541 nm (OBPF 的失谐量为 1 nm) 和 1539 nm (OBPF 的失谐量为 -1 nm), 带宽都为 0.4 nm, 得到  $S_r$  和  $S_b$  信号的频谱图和眼图分别如图 3(d)、(e) 所示。从图 3 中的四个眼图可以发现这四种 RZ 信号的模式效应都很低, 这说明在抽运光脉宽为 7 ps 的情况下, 该系统能产生四种高质量的 RZ 信号。

图 4 所示的是斯托克斯光和反斯托克斯光的功率与探测光和抽运光功率的关系。图中功率的单位是 dBm, 使该图中的输出功率和输入功率成线性关系。结果表明: 1) 保持抽运光功率不变并改变探测光功率时, 斯托克斯光功率和探测光功率成正比 ( $k_{\text{sat}}=0.974$ ), 反斯托克斯光功率和探测光功率的平方成正比 ( $k_c=1.973$ ); 2) 保持探测光功率不变并改变抽运光功率时, 斯托克斯光功率和抽运光功率的平方成正比 ( $k_{\text{sat}}=1.827$ ), 反斯托克斯光功率和抽运光功率成正比 ( $k_c=0.947$ )。基于 XPM 效应产生的  $S_r$  和  $S_b$  信号的功率与探测光和抽运光的功率则不具有这种规律。

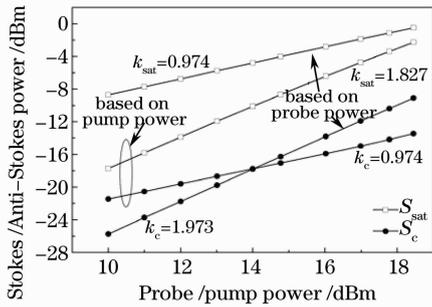


图 4 斯托克斯光和反斯托克斯光的功率与探测光和抽运光功率的关系

Fig. 4 Stokes power and anti-Stokes power as functions of probe and pump power

改变抽运光脉宽时, 四种 RZ 信号的脉宽变化如图 5 所示:  $S_c$  和  $S_{\text{sat}}$  信号的脉宽与抽运光脉宽成线性关系, 因此在 FWM 效应下通过改变抽运光脉宽可以实现 RZ 信号的脉宽可调。  $S_c$  和  $S_{\text{sat}}$  信号的脉宽都小于对应的抽运光脉宽而出现脉冲压缩现象, 这是  $S_c$  和  $S_{\text{sat}}$  信号受到抽运光 XPM 效应而发生频谱展宽造成的 [如图 3(a) 所示]。同时,  $S_{\text{sat}}$  信

号的脉宽小于  $S_c$  信号的脉宽, 由于  $S_{\text{sat}}$  信号的功率和抽运光功率的平方成正比,  $S_c$  信号功率和抽运光功率成正比, 导致  $S_{\text{sat}}$  信号的频谱与  $S_c$  信号相比较宽 [如图 3(b)、(e) 所示]。此外,  $S_r$  和  $S_b$  信号的脉宽在整个过程中分别保持 8 ps 和 9 ps 基本不变, 这是因为  $S_r$  和  $S_b$  信号是 OBPF 提取探测光展宽频谱中的感应频移成分产生的, 它们的脉宽不随抽运光脉宽的改变而改变。

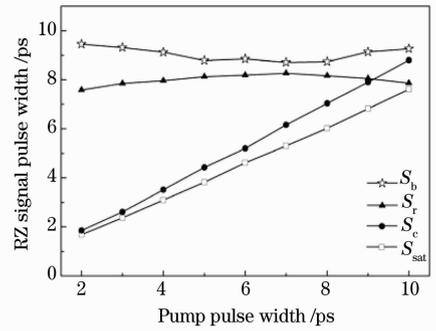


图 5 四种 RZ 信号脉宽与抽运光脉宽的关系

Fig. 5 Four RZ signal pulse widths as a function of pump pulse width

保持抽运光中心波长 1553.5 nm 不变, 通过改变探测光的中心波长来改变抽运光对探测光的波长失谐量, 此时四种 RZ 信号的转换效率如图 6 所示。在整个过程中始终保持带通滤波器 OBPF3 和 OBPF4 的失谐量为  $\pm 1$  nm, 带宽为 0.4 nm, 故  $S_r$  和  $S_b$  信号的转换效率基本保持稳定; 而  $S_{\text{sat}}$  和  $S_c$  信号的中心波长随着输入光波长失谐量的变化而变化, 它们的转换效率受波长失谐量的影响较大。在图 6 的阴影区域中, 两输入光的中心波长较近, 产生的  $S_{\text{sat}}$  和  $S_c$  信号会与输入光在频谱上发生部分重叠, 从而 OBPF 输出的是有干扰的  $S_{\text{sat}}$  和  $S_c$  信号。若是减小 OBPF1 和 OBPF2 的带宽到合适值可以

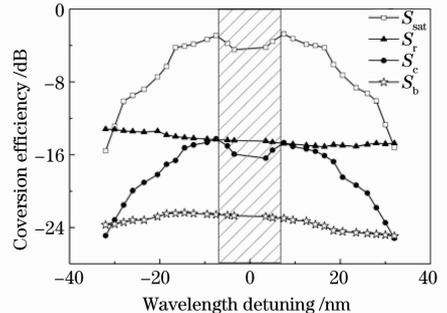


图 6 四种 RZ 信号的转换效率与抽运光对探测光波长失谐量的关系

Fig. 6 Conversion efficiencies of four RZ signals as a function of the wavelength detuning of pump to probe

得到无输入光干扰的  $S_{\text{sat}}$  和  $S_c$  信号,但是对应的转换效率会降低。阴影区域中的两输入光波长失谐量越接近零,需要的 OBPF1 和 OBPF2 的带宽值就越小,所输出的无干扰的  $S_{\text{sat}}$  和  $S_c$  信号的转换效率就越低。当两输入光中心波长重合时,  $S_{\text{sat}}$  和  $S_c$  信号的频谱与输入光频谱也完全重合,OBPF 无法提取出对应的 RZ 信号,所以在这里不考虑波长失谐量为零的情况。图 6 结果表明抽运光对探测光波长失谐量的绝对值选择 8~25 nm 之间时可以发生高转换效率的 FWM 效应。

保持抽运光平均功率 80 mW 不变,当抽运光脉宽为 2~9 ps 时,产生的四种 RZ 信号的模式效应很低,都是高质量的 RZ 信号。当抽运光脉宽为 10~15 ps 时,  $S_{\text{sat}}$  和  $S_c$  信号的模式效应依然较低,而  $S_r$  和  $S_b$  信号的模式效应则随着抽运光脉宽的增大而变大。如图 7(a)所示,模式效应的高低程度用 NLP 值来表示,  $S_r$  信号的 NLP 值不仅低于  $S_b$  信号的 NLP,而且增长较之缓慢。这是因为抽运光脉宽增大时,抽运光脉冲的前沿和后沿变得平缓,探测光与

抽运光的前后沿发生 XPM 效应后所产生的频率啁啾值减小,当原抽运光功率不能补偿探测光中减小的感应频移量时,  $S_r$  和  $S_b$  信号的 NLP 值就会随着抽运光脉宽值的增大而增大。同时由于探测光在 SPM 和 XPM 效应的作用下,其后沿附近产生振荡现象,从而探测光的蓝移量小于红移量,导致  $S_b$  信号的 NLP 值大于  $S_r$  信号的 NLP。此时如果增大抽运光功率,探测光的蓝移量随之增大,  $S_b$  信号的 NLP 值将会减小,从而提高  $S_b$  信号的质量。图 7(b)所示的即为  $S_b$  信号的模式效应与抽运光功率的关系,其中抽运光的脉宽固定为 10 ps。随着抽运光功率值的增大,TPA 效应增强,其产生的自由载流子数量逐步增加。当 TPA 和 FCA 效应引起的功率损耗值和抽运光功率的增加值达到一个平衡时,探测光的蓝移量不再变化,此时  $S_b$  信号的 NLP 值也将保持稳定。当抽运光脉宽大于 15 ps 时,探测光的蓝移量很小,且随着抽运光功率值的增大而变化不大,此时  $S_b$  信号的质量很差,所以这种情况下只能产生三种高质量的 RZ 信号。

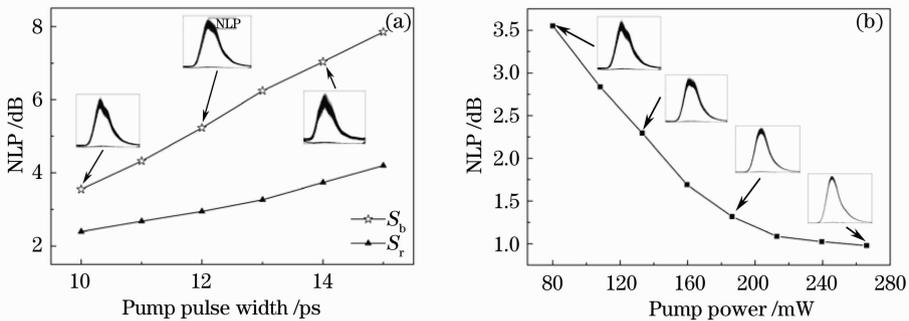


图 7 (a)  $S_b$  和  $S_r$  信号的模式效应和抽运光脉宽的关系;(b)抽运光脉宽为 10 ps 时,  $S_b$  信号的模式效应与抽运光功率的关系

Fig. 7 (a) Nonlinear patterning of  $S_b$  and  $S_r$  signals as a function of pump pulse width; (b) nonlinear patterning of  $S_b$  as a function of pump power when the pump pulse width is 10 ps

## 4 结 论

基于硅光波导的 FWM 和 XPM 效应,实现了 NRZ 到四种 RZ 光调制格式的转换。研究表明,斯托克斯光功率和探测光功率成正比,和抽运光功率的平方成正比;反斯托克斯光功率和抽运光功率值成正比,和探测光功率值的平方成正比。FWM 效应产生的两种 RZ 信号脉宽与抽运光脉宽成线性关系,且小于对应抽运光脉宽,出现脉冲压缩现象,而 XPM 效应产生的另外两种 RZ 信号的脉宽则基本保持不变。另外,抽运光对探测光的波长失谐量和抽运光脉宽分别影响着四种 RZ 信号的转换效率和质量。

## 参 考 文 献

- 1 Song Muping, Zou Lianggang. Chromatic dispersion monitoring based on four wave mixing in silicon optical waveguides [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(s1): 181~185  
宋牟平, 邹良港. 基于硅光波导四波混频的色散检测技术[J]. *中国激光*, 2010, **37**(s1): 181~185
- 2 Han Bingchen, Yu Jinlong, Luo Jun *et al.*. Multi-channel all-optical non-return-to-zero to return-to-zero format converter based on fiber optical parametric amplifier[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(11): 2962~2965  
韩丙辰, 于晋龙, 罗俊等. 基于光纤光参量放大的多通道全光非归零/归零码转换器[J]. *中国激光*, 2009, **36**(11): 2962~2965
- 3 C. Hung, K. Yu, Y. Chang *et al.*. 10 Gbit/s all-optical NRZ-to-RZ data format conversion in a dark-optical-comb injected semiconductor optical amplifier[C]. Conference on Opt. Fiber Commun. (OFC), 2006, JThB33

- 4 X. Yang, A. K. Mishra, R. J. Manning *et al.*. All-optical 42.6 Gbit/s NRZ to RZ format conversion by cross-phase modulation in single SOA[J]. *Electron. Lett.*, 2007, **43**(16): 890~891
- 5 J. Dong, X. Zhang, F. Wang *et al.*. Single-to-dual channel NRZ-to-RZ format conversion by four-wave mixing in single semiconductor optical amplifier[J]. *Electron. Lett.*, 2008, **44**(12): 763~764
- 6 C. H. Kwok, C. Lin. Polarization-insensitive all-optical NRZ-to-RZ format conversion by spectral filtering of a cross phase modulation broadened signal spectrum[J]. *IEEE J. Sel. Top. Quant. Electron.*, 2006, **12**(3): 451~458
- 7 K. P. L. Gordon, S. Chester.  $4 \times 10$  Gb/s time and wavelength multicasting with NRZ to RZ format conversion using four-wave mixing in a highly nonlinear photonic crystal fiber [C]. Conference on Opt. Fiber Commun., 2010, JWA49
- 8 W. Yu, C. Lou, X. Zhao *et al.*. Simultaneous multichannel NRZ-to-RZ format conversion of 4-ASK signal based on phase-intensity hybrid modulation and dispersion compensation fiber [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2010, **8**(9): 859~862
- 9 W. Astar, J. B. Driscoll, X. Liu *et al.*. All-optical format conversion of NRZ-OOK to RZ-OOK in a silicon nanowire utilizing either XPM or FWM and resulting in a receiver sensitivity gain of  $\sim 2.5$  dB[J]. *IEEE J. Sel. Topics Quant. Electron.*, 2010, **16**(1): 234~249
- 10 I. W. Hsieh, X. Chen, J. I. Dadap *et al.*. Cross-phase modulation-induced spectral and temporal effects on co-propagating femtosecond pulses in silicon photonic wires[J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(3): 1135~1146
- 11 S. Mikroulis, A. Bogris, E. Roditi *et al.*. Investigation of an all-optical wavelength converter with reshaping properties based on four-wave mixing in passive microring resonators [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2004, **22**(12): 2743~2748
- 12 H. K. Tsang, C. S. Wong, T. K. Liang *et al.*. Optical dispersion, two-photon absorption and self-phase modulation in silicon waveguides at  $1.5 \mu\text{m}$  wavelength [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2002, **80**(3): 416~418
- 13 O. Boyraz, P. Koonath, V. Raghunathan *et al.*. All optical switching and continuum generation in silicon waveguides [J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(17): 4094~4102
- 14 C. Koos, L. Jacome, C. Poulton *et al.*. Nonlinear silicon-on-insulator waveguides for all-optical signal processing [J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(10): 5976~5990
- 15 L. H. Yin, J. D. Zhang, P. M. Fauchet *et al.*. Optical switching using nonlinear polarization rotation inside silicon waveguides [J]. *Opt. Lett.*, 2009, **34**(4): 476~478

栏目编辑: 殷建芳