

基于硅基微环谐振器交叉相位调制效应的 非归零信号到归零信号光调制格式转换

任 艳 宋牟平

(浙江大学信息与电子工程学系, 浙江 杭州 310027)

摘要 光调制格式转换是全光通信中的一个关键技术。基于硅基微环谐振器的交叉相位调制(XPM)效应,可实现非归零(NRZ)信号到归零(RZ)信号的光调制格式转换。将探测光 NRZ 信号与抽运光时钟脉冲序列同步通过硅基微环谐振器,由于硅波导的 XPM 效应,抽运光上升沿与下降沿的功率改变使得探测光 NRZ 信号产生光频率的负啁啾与正啁啾,通过适当的光带通滤波器(OBPF)就可获得需要的 RZ 信号。研究了转换后 RZ 信号的质量与抽运光功率、脉宽以及 OBPF 对探测光的波长失谐量之间的关系。研究表明,利用硅基微环谐振器的 XPM 效应可实现芯片级的光调制格式转换。

关键词 光通信; 调制格式转换; 硅基微环谐振器; 交叉相位调制

中图分类号 TN929.11 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.0706002

Optical NRZ-to-RZ Modulation Format Conversion Based on Cross-Phase Modulation Effects in Silicon Micro-Ring Resonator

Ren Yan Song Muping

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

Abstract The optical modulation format conversion is a key technique in the future all-optical communication. An optical modulation format conversion technique from non-return-to-zero (NRZ) signal to return-to-zero (RZ) signal is presented, based on the cross-phase modulation (XPM) effect in a silicon micro-ring resonator. When a NRZ signal acting as the probe and a periodic pulse train as the pump are launched into the silicon micro-ring resonator synchronously, the power change of the pump corresponding to the rising or falling edge leads to negative or positive chirp of the probe frequency caused by XPM. The converted RZ signal can be extracted by utilizing appropriate optical band pass filters (OBPFs). The dependence of the quality of converted RZ signal on the power and pulse-width of pump is studied, as well as that on the wavelength detuning of an OBPF to the probe. It is shown that the optical modulation format conversion can be achieved in a chip by the XPM nonlinear effect of the silicon micro-ring resonator.

Key words optical communications; modulation format conversion; silicon micro-ring resonator; cross-phase modulation

OCIS codes 060.4370; 060.4510; 190.3270; 230.4320

1 引 言

光调制格式的转换是实现全光通信的一项重要技术,包括非归零(NRZ)信号到归零(RZ)信号的转换、NRZ 信号到相移键控(PSK)信号或频移键控(FSK)信号的转换等^[1]。NRZ 信号和 RZ 信号有各自的优缺点,适用于不同的光通信系统中,若能在通信网络中自由转换,将对光通信有非常重要的意义。

基于无源器件的非线性效应实现 NRZ 信号到 RZ 信号的转换是较好的技术方法^[2]。无源器件可以是光纤、硅光波导和硅基微环等^[3]。光纤的非线性系数较低,若要达到光调制格式转换的要求,所需光纤长度较长,难以集成,不利于在全光通信中的广泛应用。硅光波导不仅具有较高的非线性效应,而且可集成化生产,更有利于降低成本和规模应用^[1]。

收稿日期: 2013-03-28; **收到修改稿日期**: 2013-04-22

作者简介: 任 艳(1989—),女,硕士研究生,主要从事硅光子器件方面的研究。E-mail: 21131078@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)

而硅基微环谐振器是在硅光波导的基础上,采用谐振腔结构,利用光在腔中的多次循环,成倍地增加有效作用长度,使得非线性效应得到显著增强^[4],其作用效果远远大于同样尺寸的硅光波导,从而能进一步提高光调制格式的转换效率。

本文利用硅基微环谐振器的交叉相位调制(XPM)效应实现 NRZ 到 RZ 信号的光调制格式转换。XPM 非线性作用中,抽运光对探测光的 XPM 作用使得探测光频率产生啁啾^[5],利用光带通滤波器(OBPF)可提取出 RZ 信号。分析了抽运光的功率和脉宽以及 OBPF 对探测光波长的失谐量等因素对信号转换的影响。研究表明,利用硅基微环谐振器的 XPM 效应可实现芯片级的光调制格式转换。

2 研究内容与结果

2.1 硅微环

图 1 为硅微环谐振器的结构简图,它由半径为 R 的微环和与之耦合的直波导组合而成,耦合系数为 s ,微环和直波导传输系数为 t ,满足 $s^2 + t^2 = 1$ 的关系^[6-7]。根据 Yariv 关系式和传输矩阵法,微环各处的电场 E_1 、 E_2 、 E_3 和 E_4 有下列关系:

$$\begin{bmatrix} E_3 \\ E_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t & js \\ js & t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_4 \\ E_1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$$E_4 = \gamma E_3 \exp(-jk_1 n_{\text{eff}} L) = \gamma E_3 \exp(-j\phi), \quad (2)$$

式中 j 为虚数, k_1 是波长对应的波矢, n_{eff} 为有效折射率, L 是微环的周长, γ 为传输一周后电场剩余比例,有 $\gamma = \exp(-\alpha L/2)$, α 为线性损耗系数。 $\phi = k_1 n_{\text{eff}} L$, 为光绕微环传输一圈的相移,根据(1)式和(2)式可得出单环谐振器的幅度传递函数和相位传递函数分别为

$$T(\omega) = \frac{E_2}{E_1} = \frac{t - \gamma \exp(-j\phi)}{1 - t\gamma \exp(-j\phi)}, \quad (3)$$

$$\Phi(\omega) = \pi + \phi + \arctan\left(\frac{t \sin \phi}{\gamma - t \cos \phi}\right) + \arctan\left(\frac{\gamma t \sin \phi}{1 - \gamma t \cos \phi}\right). \quad (4)$$

由(3)式和(4)式可知,若微环半径 R 确定,微环谐振器的传递函数主要受到耦合系数 s 以及线性损耗 α 的影响。且当 $\phi = 2m\pi$ 时(m 为整数),微环工作在谐振状态,谐振波长为 $\lambda = (2\pi R n_{\text{eff}})/m$,此时,(3)式的分母简化为 $t - \gamma$, (4)式简化为 $\pi + \phi$,其中 ϕ 是光在微环中传输导致的相位偏移^[8]。若选取 $t = \gamma$,硅基微环谐振器工作于临界耦合状态,此时,从直波导传输到透射端的光场与从微环谐振腔中耦

合到透射端的光场强度相同,相位相差 180° ,透射端 E_2 没有输出。

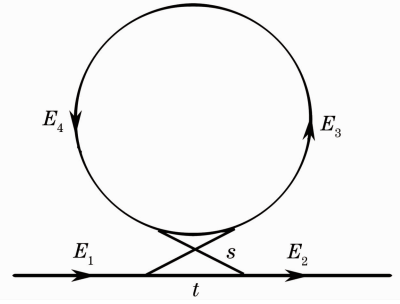


图 1 单环谐振器的结构图

Fig. 1 Structure of single micro-ring resonator

2.2 光调制格式转换

当光在非线性材料中传输时,由于光克尔效应的作用,光信号强度的变化导致传输介质折射率的变化,从而引起光信号自身的相位变化;同时,一个波长光信号的功率波动会引起另一波长光信号的相位波动;前者称为自相位调制(SPM)效应,后者称为 XPM 效应^[9-10]。基于硅微环谐振器 XPM 效应实现 NRZ 信号到 RZ 信号转换的原理框图如图 2 所示,探测光 NRZ 信号和抽运光时钟脉冲信号同时注入硅微环谐振器的输入端,在 XPM 非线性作用下产生光频移,输出信号经 OBPF 滤波,得到 RZ 信号。

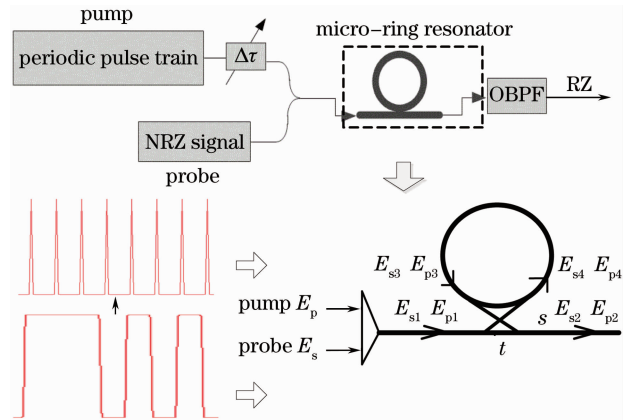


图 2 基于硅基微环谐振器实现 NRZ 到 RZ 光调制格式转换的系统框图

Fig. 2 System setup of NRZ-to-RZ optical modulation format conversion based on silicon micro-ring resonator

选取探测光 E_s 和抽运光 E_p 位于不同的谐振波长,并选择合适的线性损耗系数 α 和耦合系数 s ,使得单环谐振器位于临界耦合状态,探测光 NRZ 信号和抽运光时钟脉冲信号被同时耦合进入微环进行传输^[11]。如图 2 所示,由于最终提取的是探测光信号的频移信息,而抽运光的峰值功率远大于探测光的峰值功率,因此可忽略探测光对抽运光的 XPM

作用,仅考虑抽运光对探测光的 XPM 作用,同时考虑到抽运光自身的 SPM 效应和微环的双光子吸收 (TPA) 效应^[1],对比(2)式,微环中传输的探测光 E_s 和抽运光 E_p 将产生不同的变化:

$$E_{s3} = E_{s1} \exp\left(-\frac{\alpha}{2}L - 2\alpha_{\text{TPA}}L - j2\gamma_s E_{p4}^2 L - j\phi\right), \quad (5)$$

$$E_{p3} = E_{p1} \exp\left(-\frac{\alpha}{2}L - \alpha_{\text{TPA}}L - j\gamma_p E_{p4}^2 L - j\phi\right), \quad (6)$$

式中 α_{TPA} 为双光子吸收引起的损耗,有 $\alpha_{\text{TPA}} = (\beta_{\text{TPA}}/A_{\text{eff}})E_{p4}^2$,其中 β_{TPA} 为双光子吸收系数。 γ_s 和 γ_p 代表非线性系数,分别为 $\gamma_p = 2\pi n_2 f_p / cA_{\text{eff}}$, $\gamma_s = 2\pi n_2 f_s / cA_{\text{eff}}$ 。

实现码型转换的原理如图 3 所示的时域波形示意图,同步注入微环谐振器的探测光和抽运光信号具有相同的码元周期。当探测光 NRZ 信号为“1”时,由于 XPM 效应,抽运光脉冲上升沿时的功率骤增导致探测光信号产生负啁啾,频谱有红移现象;而抽运光脉冲下降沿时的功率骤减则导致探测光产生正啁啾,光频谱有蓝移现象^[12]。而当探测光 NRZ 信号为“0”时,不能产生这种啁啾。由硅基微环非线性导致的传递曲线红移使得探测光和抽运光均能够传递出来,且频谱得到了展宽^[9],探测光的频移成分能够被合适的 OBPF 筛选出来,且携带 NRZ 信号的信息,即完成 NRZ 信号到 RZ 信号的转换。

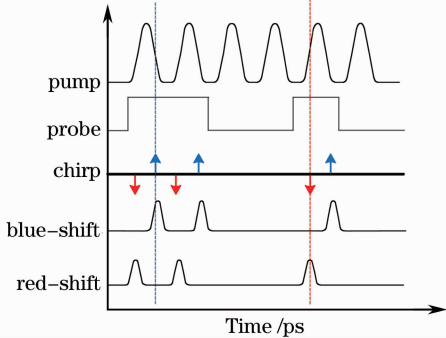


图 3 基于硅基微环谐振器 XPM 效应实现 NRZ 信号到 RZ 信号转换的原理图

Fig. 3 Schematic diagram of NRZ-to-RZ optical modulation format conversion based on XPM effect in silicon micro-ring resonator

2.3 研究结果

当不考虑 XPM 等非线性效应时,得到单环谐振器临界耦合状态时的功率传递曲线和相位传递曲线如图 4(a)和(c)所示。从中可以看出,当传递光的波长在谐振波长附近时,会产生幅度和相位的变化,即处于谐振波长上的光能够全部耦合进入微环传输^[9]。考虑微环的非线性效应,传递函数曲线会

发生红移^[9],如图 4(b)所示,导致谐振波长的光也能透射出去。图 4 仿真参数为:微环半径 $R = 20 \mu\text{m}$,有效折射率 $n_{\text{eff}} = 2.53$,硅基微环谐振器的线性损耗系数 $\alpha = 7 \text{ dB/cm}$,耦合系数 $s = 0.2$ 。

经过硅基微环谐振器的 XPM 非线性作用,光信号频谱会得到展宽^[13-14],由于抽运光峰值功率较探测光功率大很多,XPM 的作用会使探测光信号频谱展宽比较明显,足以提取频移信息,实现 RZ 信号的重建。根据硅微环谐振波长和实际硅微环的性能,计算参数选取为:微环半径 $R = 20 \mu\text{m}$,有效场面积 $A_{\text{eff}} = 0.0997 \text{ m}^2$,非线性折射率系数 $n_2 = 1.3 \times 10^{-17} \text{ m}^2/\text{W}$,有效折射率 $n_{\text{eff}} = 2.53$ 。探测光 E_s 为 NRZ 开关键控(OOK)信号,中心频率 f_s 为 194.38 THz (中心波长 λ_s 为 1542.3 nm),功率为 25 mW (14 dBm),脉宽为 100 ps 。抽运光 E_p 是中心频率 f_p 为 192.50 THz (中心波长 λ_p 为 1557.4 nm),平均功率为 50 mW (17 dBm),脉宽为 3 ps 的一阶高斯脉冲,脉冲间隔为 100 ps 。硅基微环谐振器的线性损耗系数 $\alpha = 7 \text{ dB/cm}$,耦合系数 $s = 0.2$,双光子吸收系数 $\alpha_{\text{TPA}} = 7 \times 10^{-12} \text{ m/W}$ 。

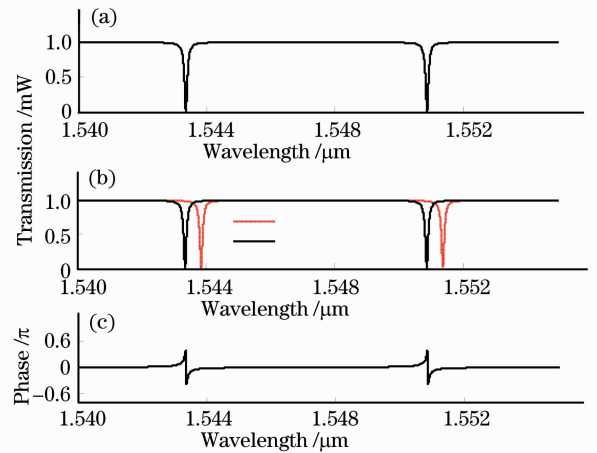


图 4 单环谐振器的幅度传递曲线和相位传递曲线。(a)幅度传递曲线;(b)XPM 效应导致传递曲线红移;(c)相位传递曲线

Fig. 4 Amplitude transmission curves and phase transmission curve of the single micro-ring resonator. (a) Amplitude transmission curve; (b) red-shift of the transmission curve caused by XPM effect; (c) phase transmission curve

信号 Q 值与误码率(BER)有对应关系,是衡量 NRZ 信号到 RZ 信号转换性能的参数,具体定义为高电平“1”和低电平“0”电压均值的差值与它们均方差之和的比值^[14]。对展宽后探测光 NRZ 信号的频谱进行分析,选取 OBPF 中心波长为 1541.3 nm ,其对

探测光波长失谐量为 -1 nm , 3 dB 带宽为 0.3 nm , 经仿真计算得到 Q 值为 10.1 dB 的 RZ 信号。

保持探测光和抽运光波长、功率以及 OBPF 位置等参数不变, 仅改变抽运光的输入功率时, 对应 RZ 信号的 Q 值的变化如图 5 所示。当抽运光功率低于 50 mW 时, 转换后的 RZ 信号质量很差, 原因在于, 降低抽运光的峰值功率相当于降低了 XPM 效应, 使得探测光频率啁啾不明显, OBPF 不能有效扑捉到频移信息^[15-16]。当抽运光功率大于 1500 mW 时, RZ 信号 Q 值随着抽运光功率升高不再继续升高。当抽运光功率低于 1000 mW 时, 在不考虑线性损耗和双光子吸收的条件下, RZ 信号有更好的转换效率。当抽运光峰值功率在 600 mW 左右时, RZ 信号 Q 值变化曲线出现一个峰值, 此后, 随着抽运光功率的增加, RZ 信号的 Q 值降低, 当抽运光功率大于 1000 mW 时, 两条曲线变化趋于一致。这表明当抽运光功率较低时, 线性损耗和双光子吸收对于 NRZ 信号到 RZ 信号的转换影响较大, 由(1)~(4)式可知, 线性损耗系数 α 对探测光和抽运光在微环中的传递函数产生影响, 双光子吸收系数 β_{TPA} 则导致微环中传输的光信号产生双光子吸收损耗。因此, 当线性损耗和双光子吸收系数变化时, 微环中各点传输光的功率值产生相应的变化, RZ 信号 Q 值变化曲线也有所不同。当抽运光功率较大时, 线性损耗系数和双光子吸收系数的影响可以忽略不计。

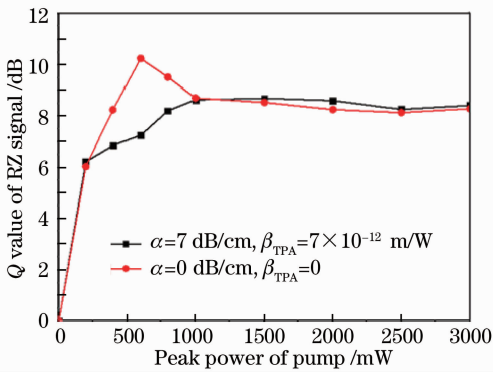


图 5 基于不同线性损耗系数和双光子吸收系数 RZ 信号 Q 值与抽运光峰值功率的关系

Fig. 5 Q value of RZ signals as a function of peak power of pump based on different linear loss values and two-photon absorption coefficients

图 6 显示了抽运光脉宽对 RZ 信号质量的影响, 图中小图形为该点 RZ 信号眼图。抽运光的脉宽与带宽存在傅里叶变换极限的关系, 在光谱相位一致的情况下, 较宽的带宽对应着较窄的脉宽。抽运光的一阶高斯脉宽对 RZ 信号 Q 值有很大的影

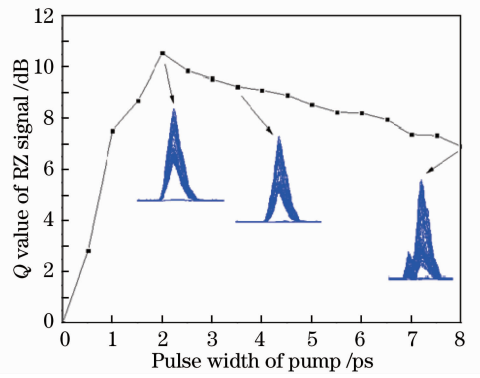


图 6 RZ 信号 Q 值随抽运光脉宽的变化

Fig. 6 Q value of RZ signal varying with the pulsewidth of pump

响^[17], 当脉宽低于 1 ps 或者高于 4 ps 时, 转换后的 RZ 信号的质量都不理想, 抽运光脉宽反映了抽运光上升沿或下降沿时功率变化的速率, 由于克尔效应的作用, 抽运光功率的波动引起探测光频谱产生红移或蓝移现象, 采用合适的 OBPF 滤波可得到 RZ 信号^[18]。图 6 说明, 当抽运光选取脉宽 2 ps 左右的一阶高斯脉冲时, 可以获得质量较高的 RZ 信号。

如图 7 所示, 图中小图形为该点 RZ 信号眼图, 探测光经过微环传输后, 频谱得到展宽, 且在失谐量为 2 nm 内时展宽量比较明显, 由于抽运光上升沿和下降沿时的功率跳变引起探测光产生不同的频率啁啾, 合理的 OPBF 对于正确提取 NRZ 展宽的频谱中的 RZ 频谱是非常重要的。OBPF 失谐量的选取是由硅基微环的 XPM 非线性效应导致的频移量决定的, 影响频移量大小的因素有抽运光的信号强度和 nonlinear 系数。根据经过微环传输展宽后的 NRZ 信号频谱图, 选择 OBPF 位于探测光波长附近不同位置处进行滤波, 3 dB 带宽为 0.3 nm , 得到如图 8 所示的曲线图。根据实际情况, 通常 OBPF 对探测光的波长失谐量选取为 1 nm 或者 2 nm 能够

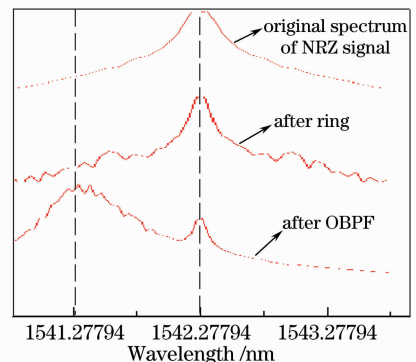


图 7 NRZ 信号的频谱变化图

Fig. 7 Change of spectrum of NRZ signal

达到比较好的效果。XPM 效应导致的探测光的频移量要能够覆盖到 OBPF 的位置^[19],才能有效提取出红移或蓝移频谱,否则,若 OBPF 对探测光的波长失谐量过大,则无法很好地检测到 NRZ 信号的频移信息,转换后的 RZ 信号会产生严重失真。

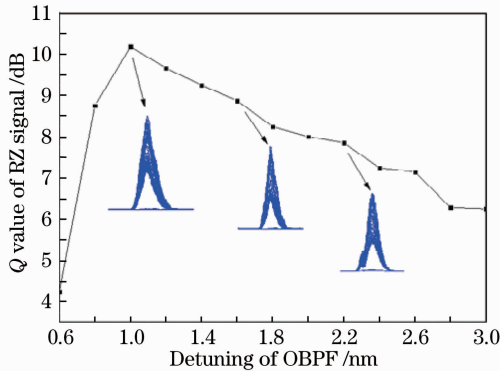


图 8 RZ 信号 Q 值随 OBPF 失谐量的变化

Fig. 8 Q value of RZ signal varying with the detuning of OBPF

3 结 论

基于硅基微环谐振器的 XPM 效应,可实现 NRZ 码到 RZ 码光调制格式的芯片级转换。研究表明,抽运光功率和脉宽都对转换后的 RZ 信号的质量产生影响,且在一定范围内,增加抽运光功率或者减少抽运光脉宽,都能够提高 RZ 信号的质量。同时探讨了 OBPF 对探测光的波长失谐量对 RZ 信号质量的影响,当抽运光功率取值不变时,失谐量较小则产生的 RZ 信号质量较好。

参 考 文 献

- Yunhong Ding, Peucheret Christophe, Minhao Pu, *et al.*. RZ-to-NRZ format conversion at 50 Gb/s based on a silicon microring resonator [C]. Proceeding of the 15th OptoElectronics and Communications Conference, 2010. 862–863.
- Cishuo Yan, Tong Ye, Yikai Su. All-optical regenerative NRZ-OOK-to-RZ-BPSK format conversion using silicon waveguides [J]. Opt Lett, 2009, 34(1): 58–60.
- Zhang Bolin, Song Muping. Optical NRZ-to-RZ modulation format conversion based on nonlinear effects in silicon optical waveguide[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(s1): s105003. 张博琳,宋牟平. 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[J]. 中国激光, 2011, 38(s1): s105003.
- 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.
- Lin Mi, Zhang Yang'an, Zhang Jinnan, *et al.*. Influence of nonlinear effects in 112 Gb/s transmission co-propagating multi-rate neighbors[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(3): 0306006. 林 密,张安阳,张锦南,等. 112 Gb/s 信号混传多种速率信号的非线性效应影响[J]. 光学学报, 2012, 32(3): 0306006.

- Zou Lianggang, Song Muping. Dispersion monitoring based on nonlinear effects in silicon optical waveguides [J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(4): 944–948. 邹良港,宋牟平. 基于硅光波导非线性效应的色散监测技术研究 [J]. 光学学报, 2010, 30(4): 944–948.
- Yang Jianyi, Jiang Xiaoqing, Wang Minghua, *et al.*. Characteristics and limitations of optical filters employing single-ring microresonators [J]. J Optoelectronics•Laser, 2003, 14(1): 12–15. 杨建义,江晓清,王明华,等. 采用单环微谐振器的光滤波器特性及其局限性[J]. 光电子·激光, 2003, 14(1): 12–15.
- 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监测技术[J]. 中国激光, 2010, 37(s1): 181–185.
- 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 Quantum Electron, 2006, 12(3): 451–458.
- K P L Gordon, S Chester. 4×10 Gb/s time and wavelength multicasting with NRZ to RZ format conversion using four-wave mixing in a highly nonlinear photonic crystal fiber [C]. Proceeding of the IEEE Conference on Optical Fiber Communication, 2010. 1–3.
- 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.
- 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 ~ 2.5 dB [J]. IEEE J Sel Top Quantum Electron, 2010, 16(1): 234–249.
- 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.
- Wen Feng, Wu Baojian, Li Zhi, *et al.*. Loss performance of optical devices based on high nonlinear fibers [J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(s1): s100308. 文 峰,武保剑,李 智,等. 非线性光纤器件的损耗性能测量 [J]. 光学学报, 2010, 30(s1): s100308.
- 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.
- 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.
- 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.
- Zang Jinlong, Yu Chongxiu, Wang Kuiru, *et al.*. Demodulation system for phase-locked fiber grating sensors based on XPM [J]. J Optoelectronics•Laser, 2008, 19(6): 743–747. 张锦龙,余重秀,王葵如,等. 基于 XPM 的锁相光纤光栅传感器解调系统 [J]. 光电子·激光, 2008, 19(6): 743–747.
- 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]. Proceeding of the IEEE Conference on Optical Fiber Communication (OFC), 2006. 3–5.