

# 基于微环谐振器和窄带滤波器的全光归零到非归零码型转换

董小伟 谢媛 刘文楷

北方工业大学电子信息工程学院, 北京 100144

**摘要** 基于信号频谱变换的原理,利用微环谐振器的梳状谱传输特性,辅助以窄带滤波器,将全光归零(RZ)码信号的频谱包络转变为较理想的非归零(NRZ)码信号的频谱包络,从而实现RZ码到NRZ码的码型转换。详细研究了转换后的NRZ信号眼图质量与设备因素,如窄带滤波器的选择、微环谐振器的耦合条件以及输入信号RZ码占空比的关系。结果表明窄带滤波器为2阶巴特沃斯滤波器时,微环谐振器的耦合条件以及RZ码占空比对码型转换效果的影响较小。另外,通过调整微环谐振器的尺寸,设计的码型转换器能与不同速率的系统相兼容,能更好地适应未来光网络的发展。

**关键词** 光通信; 码型转换; 微环谐振器; 归零码; 非归零码

中图分类号 TN253

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP52.020603

## All-Optical RZ-to-NRZ Format Conversion Based on Micro-Ring Resonator and Narrow Bandpass Filter

Dong Xiaowei Xie Yuan Liu Wenkai

College of Electronic and Information Engineering, North China University of Technology, Beijing 100144, China

**Abstract** Based on signal spectral transforming principle, an all-optical return-to-zero (RZ) to non-return-to-zero (NRZ) format conversion is realized by using a micro-ring resonator with the comb transmission spectrum and a narrow bandpass filter. Influences of devices' parameters, such as different narrow bandpass filters, coupling conditions of micro-ring resonator and duty ratio of the RZ input signal, on eye-diagram quality of converted NRZ signal are investigated in detail. Results demonstrate that 2-order Butterworth filter is expected to decrease the influences of coupling conditions and the duty ratio of RZ signal on the conversion performances. In addition, by adjusting the ring-resonator size, the designed RZ-to-NRZ format converter is compatible with system having several bit rates signals. This will be better adapt to the development of future optical networks.

**Key words** optical communications; format conversion; micro-ring resonator; return-to-zero code; non-return-to-zero code

**OCIS codes** 060.2330; 060.4080; 060.4370; 060.4510

## 1 引言

归零(RZ)码和非归零(NRZ)码是全光码型转换中用的比较广泛的码型。未来高速光通信网络基本包含光波分复用技术和光时分复用技术<sup>[1]</sup>。在光波分复用系统中,NRZ码具有频谱效率高、时间抖动容忍度大等优点,而在光时分复用网络系统中RZ码具有占空比小、平均光功率低等优点<sup>[2]</sup>。为了满足光波分复用和光时分复用网络间的交换,需要进行RZ和NRZ两种码型的互相转换。

目前,实现全光RZ到NRZ码型转换技术常见的方案有:基于微波光子滤波<sup>[3]</sup>、基于高非线性光纤交叉相位调制效应<sup>[4]</sup>、基于半导体光放大器和滤波器组合<sup>[5]</sup>、基于时延不对称非线性光纤环镜<sup>[6]</sup>以及基于马赫-曾德

收稿日期: 2014-08-19; 收到修改稿日期: 2014-09-01; 网络出版日期: 2015-01-09

基金项目: 北京市属高等学校高层次人才引进与培养计划(CIT&TCD201304001)、北京市委组织部优秀人才项目(2012D005002000001)、北方工业大学科研人才提升计划项目(CCXZ201307)

作者简介: 董小伟(1978—),女,副教授,主要从事光纤通信及光电子器件等方面的研究。E-mail: way7803@163.com

尔干涉型波长转换器<sup>[7]</sup>等方案。但是这些方案都存在一定的不足。例如,基于半导体光放大器全光码型转换方案,由于受到载流子恢复时间的限制,当输入信号的速率较高时,载流子浓度不能恢复到初始值<sup>[8]</sup>,因而限制其在更高速率光网络中的应用;基于非线性光纤环形镜的码型转换方案,对输入信号的质量要求比较严格,且系统对偏振态极为敏感,而实际光路中信号的偏振态往往随机波动,难以控制<sup>[9]</sup>,故而限制了其在实际中的应用。

近年来,微环谐振器(MRR)因其低成本、低串扰、高集成度等优点,广泛应用于调制、光开关、滤波、色散控制等方面<sup>[10-13]</sup>,在全光码型转换中,其应用也越来越受到研究人员的重视<sup>[14-17]</sup>。利用微环谐振器的光谱滤波特性,文献[15]实现了50 Gb/s的RZ到NRZ码型转换;文献[16-17]实验显示了多信道的RZ到NRZ码型转换。本文以上述实验为基础,给出了基于微环谐振器和窄带滤波器的全光码型转换器,讨论了实现RZ到NRZ码转换的理论依据,分析了窄带滤波器的选择、微环耦合状态、RZ码占空比对转换后NRZ信号质量的影响,以及与更高速率系统的兼容性,证实了该码型转换器的优越性。

## 2 工作原理

图1为基于单微环谐振器和窄带滤波器实现RZ到NRZ码型转换的系统框图。10 Gb/s伪随机二进制脉冲序列(PRBS)RZ光信号经过掺铒光纤放大器(EDFA)及偏振器(PC)调节后,进入单微环谐振器中传输,微环谐振器的自由光谱范围(FSR)为输入信号速率的两倍。利用微环谐振器的梳状谱传输特性,滤除RZ光信号的奇次谐波分量,再经窄带滤波器(BPF)压缩频谱,滤除多余偶次谐波,即可得到较为理想的NRZ信号的频谱,完成RZ码到NRZ码的转换<sup>[16]</sup>。通过示波器中的眼图,可观察转换后NRZ光信号的质量。

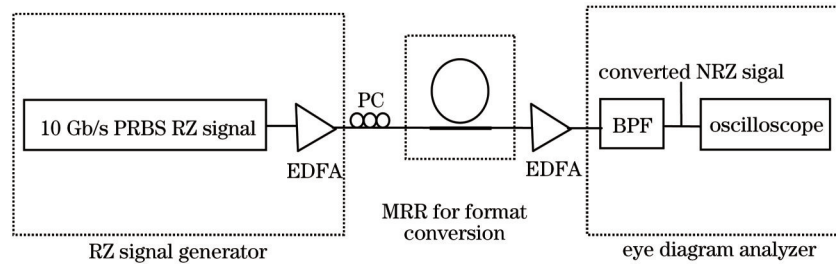


图1 基于微环谐振器和窄带滤波器的RZ到NRZ码型转换的系统框图

Fig.1 Schematic diagram of RZ-to-NRZ format conversion based on MRR and BPF

输入信号是速率为10 Gb/s的超高斯型脉冲伪随机RZ码<sup>[18-19]</sup>,由频率为 $f_0$ 的光载波进行调制,可以表示为

$$x(t) = \sum_{l=0}^{n-1} a_l U(t - lT_0) \exp(i2\pi f_0 t) = \sum_{l=0}^{n-1} a_l \exp\left[-\frac{1+iC}{2} \left(\frac{t-lT_0}{dt_0}\right)^{2m} + i2\pi f_0 t\right], \quad (1)$$

式中 $t$ 为时间, $T_0$ 是一个RZ码的周期, $t_0$ 是在强度为 $\frac{1}{e}$ 时的脉冲半宽度, $C$ 为线性啁啾参量, $m$ 为脉冲前后沿的锐度参量<sup>[19]</sup>, $d$ 是高斯脉冲的占空比, $d=0.5$ 时表示占空比为50%的RZ光信号。 $n$ 为伪随机序列的长度, $a_l$ 取值为0或者1,表示对应位的码字为0码或1码<sup>[20]</sup>。为方便研究,设 $C=0$ , $m=2$ ,并且在光纤中传输时无色散无损耗。

RZ光信号进入半径为 $R$ 的单微环谐振器传输,微环的传输特性为<sup>[21]</sup>

$$\mathcal{T} = \left| \frac{E_t}{E_m} \right|^2 = \left| \frac{\zeta - \alpha \exp(i\varphi)}{1 - \alpha \zeta \exp(i\varphi)} \right|^2, \quad (2)$$

式中 $E_m$ 为输入RZ光信号场强, $E_t$ 为微环的透射光场, $\alpha = \exp(-\alpha_0 L/2)$ 为微环的环程透射系数, $\alpha_0$ 为损耗系数, $\zeta$ 为微环和直波导传输系数, $k$ 为耦合系数,对于无损耗耦合区域,其满足 $k^2 + \zeta^2 = 1$ 的关系<sup>[21]</sup>。光在环形波导中绕一周的相移可表示为 $\varphi = \frac{2\pi f}{c_0} n_{\text{eff}} L$ , $f$ 为信号频率, $c_0$ 为真空中的光速, $n_{\text{eff}}$ 为波导的有效折射率, $L = 2\pi R$ 为微环的周长。微环半径 $R$ 与FSR呈反比例关系,调节 $R$ 大小可以使FSR为RZ光信号速率的两倍,调节微环的下陷梳状谱,使其对准RZ信号的奇次谐波,将信号的奇次谐波分量滤去,再选择合适的窄带滤波器滤除RZ信号的偶次谐波,使信号频谱包络变成较理想的NRZ信号频谱包络,从而完成RZ到NRZ的转

换过程。转换后的时域NRZ光信号  $y(t)$  可以表示为

$$y(t) = \text{IFFT}\{\text{FFT}[x(t)] \cdot \mathcal{F}H\}, \quad (3)$$

式中  $x(t)$  为RZ光信号,  $H$  为窄带滤波器的频率响应, FFT表示快速傅里叶变换, IFFT表示傅里叶的反变换。

### 3 数值分析和讨论

基于上述的理论分析,讨论 10 Gb/s 的RZ信号到NRZ信号的码型转换,转换原理如图2(a)所示。RZ信号速率为 10 Gb/s,微环的FSR为RZ码速率的两倍,即 20 GHz,将微环的下陷梳状谱对准RZ信号的奇次谐波。利用微环的梳状谱传输特性,有效滤除RZ信号的奇次谐波,得到的输出信号频谱及眼图如图2(b)所示,由于信号频谱存留偶次谐波,码型转换后的效果不理想,为此需要附加一个合适的窄带滤波器对信号频谱进行压缩,滤除多余的偶次谐波,从而获得较好的NRZ频谱,最终完成从RZ码到NRZ码的转换,其结果如图2(c)所示。

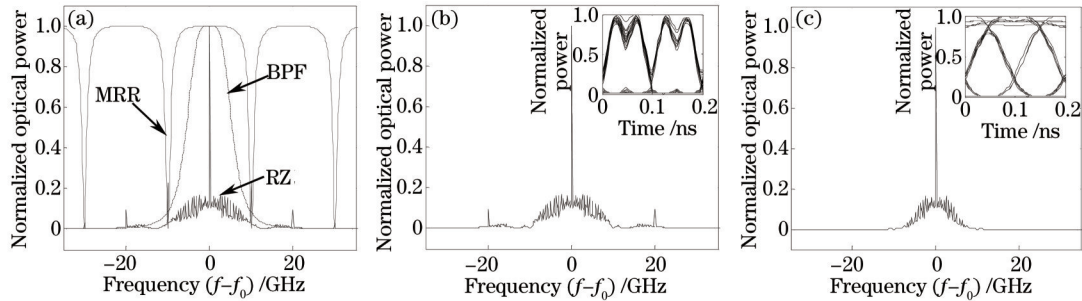


图2 (a) 基于微环谐振器和窄带滤波器进行码型转换的原理图; (b) 仅经微环谐振器滤波的信号频谱及眼图(插图); (c) 经微环谐振器和窄带滤波器联合滤波后的NRZ信号频谱及眼图(插图)

Fig.2 (a) Principle of format conversion based on MRR and BPF; (b) spectrum and eye diagram(inset) of signal filtered by MRR; (c) spectrum and eye diagram(inset) of converted NRZ signal after MRR and BPF

由于窄带滤波器在RZ到NRZ码转换过程中具有非常重要的作用,需进一步分析不同窄带滤波器对码型转换效果的影响。图3(a),(b)分别为  $N=1, 2, 4$  阶的巴特沃斯滤波器和切比雪夫滤波器<sup>[22]</sup>滤波,可以看出,随着滤波器阶数  $N$  的增加,通带越平坦,频带下降越陡峭。

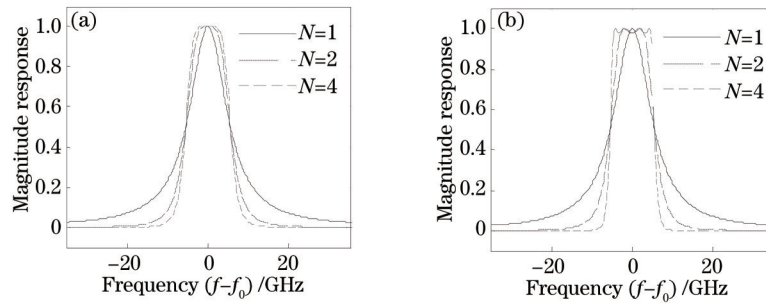


图3  $N=1, 2, 4$  的阶(a)巴特沃斯滤波器和(b)切比雪夫滤波器滤波

Fig.3 Spectra of  $N=1, 2, 4$  order (a) Butterworth filter and (b) Chebyshev filter

图4为当输入信号为50%占空比的RZ光信号且微环处于临界耦合条件时,分别使用  $N=1, 2, 4$  阶的巴特沃斯滤波器和切比雪夫滤波器进行滤波后输出的NRZ信号的眼图。从图中可以看出,对于同一滤波器,2阶滤波后的眼图张开程度较大,信号幅度抖动较小,说明码型转换后的NRZ码的噪声容限较大,且码间干扰较小。这是因为:对于1阶滤波器,其过渡带下降较缓慢,无法有效抑制信号的偶次谐波,从而导致眼图抖动较大;对于4阶滤波器,其过渡带下降太陡峭,滤波后的信号频谱与理想NRZ频谱相比,减少了一部分有用的信号频谱成分,从而导致眼图张开程度较小。对比2阶巴特沃斯滤波与2阶切比雪夫滤波的眼图可以看到,选择2阶巴特沃斯滤波器可以使得转换后的NRZ码质量更好。方案中的巴特沃斯滤波器和切比雪夫滤波器,均可以采用串联微环谐振器来进行构造<sup>[23]</sup>。

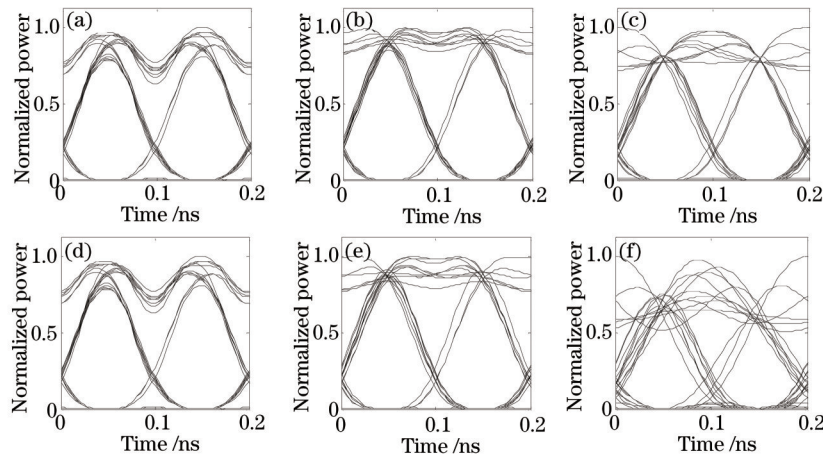


图4 (a), (b), (c)分别为经微环谐振器和 $N=1,2,4$ 阶巴特沃斯滤波器滤波后的NRZ信号眼图; (d), (e), (f)分别为经微环谐振器和 $N=1,2,4$ 阶切比雪夫滤波器滤波后的NRZ信号眼图

Fig.4 (a), (b), (c) Eye diagrams of converted NRZ signal after MRR and  $N=1,2,4$  order Butterworth filter, respectively;

(d), (e), (f) eye diagrams of converted NRZ signal after MRR and  $N=1,2,4$  order Chebyshev filter, respectively

图5为微环不同耦合条件对码型转换后的眼图,选择占空比为50%的RZ光信号,窄带滤波器为2阶巴特沃斯滤波器。其中,图5(a)、(b)、(c)分别为欠耦合( $k < \sqrt{1-\alpha^2}$ )、临界耦合( $k = \sqrt{1-\alpha^2}$ )、过耦合( $k > \sqrt{1-\alpha^2}$ )条件下,微环谐振器的传输谱图以及经过微环谐振器滤波后的信号频谱图。图5(d)、(e)、(f)分别为对应三种耦合条件下,经微环谐振器和2阶巴特沃斯滤波器联合作用后的NRZ信号频谱及眼图,可以看出,虽然欠耦合和过耦合条件下,利用微环滤波器的梳状特性很难有效去除RZ频谱中的奇次谐波,但由于巴特沃斯滤波器对RZ频谱进一步的压缩,有效抑制了RZ信号中的残留谐波,从而使得最后滤波后的码型转换效果受耦合条件的影响较小。故可以考虑设计一种理想的2阶巴特沃斯滤波器,直接实现RZ到NRZ码型转换的新方法。

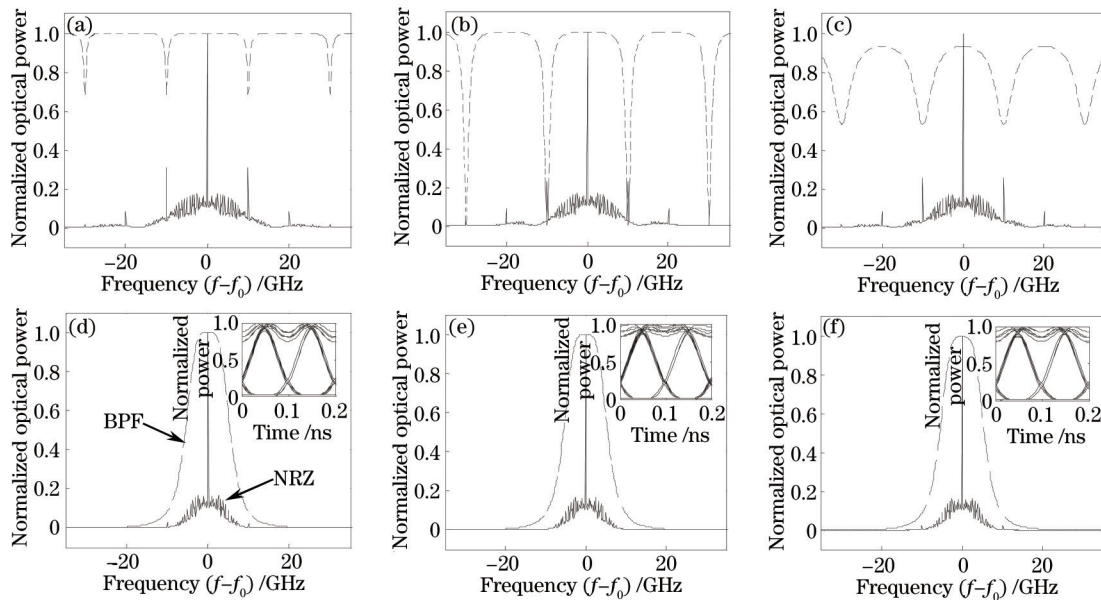


图5 (a), (b), (c)分别为欠耦合、临界耦合、过耦合条件下微环的传输谱(点线)以及仅经微环谐振器滤波的信号频谱(实线); (d), (e), (f)转换后的NRZ信号

Fig.5 (a), (b), (c) Transfer functions of MRR(dotted line) and spectra of signal filtered by MRR (solid line) at under

coupling, critical coupling, over coupling, respectively; (d), (e), (f) converted NRZ signal, respectively

图6为占空比分别是33%、50%、66%的RZ光信号的频谱以及在临界耦合条件下,使用2阶巴特沃斯滤波器滤波后的NRZ信号眼图。可以看出,虽然不同占空比的RZ信号的频谱也不同,即占空比越小的RZ信号,其频谱越宽,谐波分量也越大,但是经过码型转换后,都可以得到质量较好的NRZ信号。这说明,基于微环谐振器和2阶巴特沃斯滤波器的组合进行RZ到NRZ码型转换的方案,对输入的RZ信号质量的要求比较低。

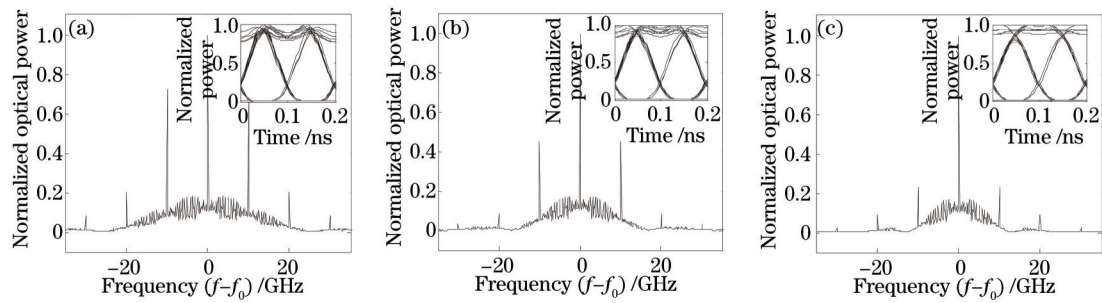


图6 (a), (b), (c) 分别为 33%, 50%, 66% 占空比的 RZ 信号频谱及转换后的 NRZ 信号眼图(插图)

Fig.6 (a), (b), (c) Spectra of RZ signal with 33%, 50%, 66% duty-cycle and eye diagram (inset) of converted NRZ signal, respectively

另外,为适应未来光网络的发展,全光码型转换需与更高的信号速率相兼容。由于微环谐振器的 FSR 与器件尺寸近似成反比,如图 7(a)所示。调节环半径,可以有效增加微环谐振器的 FSR,使 FSR 为 80 GHz,利用微环谐振器的下陷梳状谱滤除 RZ 信号的奇次谐波,再辅以窄带滤波器对 RZ 频谱进行压缩(从图 7 中可以看出,窄带滤波器相比 10 GHz 的带宽变宽),也可实现速率为 40 Gb/s 的 RZ 信号到 NRZ 信号的码型转换,图 7(b)为利用微环谐振器和窄带滤波器的组合,实现 40 Gb/s 的 RZ 到 NRZ 码型的转换过程,图 7(c)为滤波后的 NRZ 信号频谱及眼图。

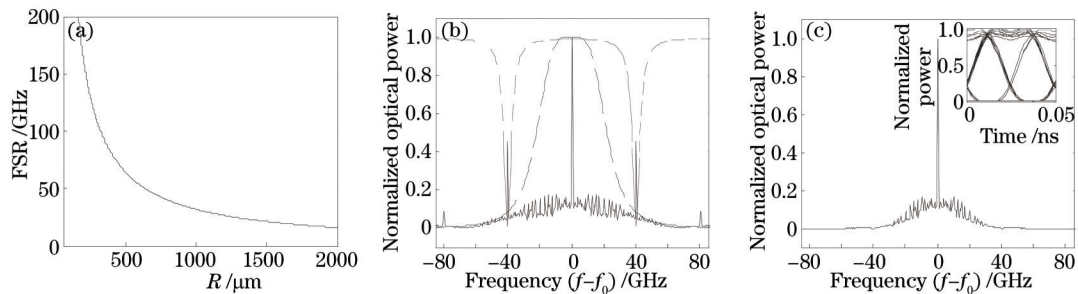


图 7 (a) 自由光谱范围随微环半径的变化; (b) 40 Gb/s 的 RZ 到 NRZ 的码型转换; (c) 40 Gb/s 码型转换后的 NRZ 信号频谱图及眼图(插图)

Fig.7 (a) FSR as a function of radius of micro-ring resonator; (b) RZ-to-NRZ format conversion at 40 Gb/s; (c) Spectrum and eye diagram(inset) of converted NRZ signal at 40 Gb/s

## 4 结 论

利用微环谐振滤波器和窄带滤波器滤波器的组合,研究了速率为 10 Gb/s 的全光 RZ 到 NRZ 的码型转换,以及不同窄带滤波器、耦合条件、占空比对转换后 NRZ 码信号质量的影响。结果表明:选择 2 阶巴特沃斯滤波器作为窄带滤波器时,可以有效避免耦合条件以及占空比对码型转换效果的影响。另外,根据微环谐振器的 FSR 与环半径大小成反比的特性,通过减小环半径,实现了 40 Gb/s 的 RZ 码到 NRZ 码的转换。随着制作工艺的不断进步,微环谐振器在未来高速率的通信网络中将发挥更好的实用价值。

## 参 考 文 献

- 1 Luca Banchi, Marco Presi, Antonio D'Errico, *et al.*. All-Optical 10 and 40 Gbit/s RZ-to-NRZ format and wavelength conversion using semiconductor optical amplifiers[J]. *J Lightwave Technol*, 2010, 28(1): 32-38.
- 2 Wang Weiqiang, Zhang Jianguo, Yao Baoli, *et al.*. A novel scheme of all optical RZ to NRZ format converter[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, 37(9): 1837-1841.  
王伟强, 张建国, 姚保利, 等. 一种全光归零码到非归零码变换的新技术方案[J]. *光子学报*, 2008, 37(9): 1837-1841.
- 3 Xu Jing, Jiang Yang, Zhou Zhuya, *et al.*. Return-to-zero/non-return-to-zero signal date format conversion based on microwave photonic filter[J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(9): 0905008.  
徐 静, 江 阳, 周竹雅, 等. 基于微波光子滤波器的归零到非归零码型转换研究[J]. *中国激光*, 2012, 39(9): 0905008.
- 4 A L Yi, L S Yan, B Luo, *et al.*. Simultaneous all-optical RZ-to-NRZ format conversion for two tributaries in PDM signal using a single section of highly nonlinear fiber[J]. *Opt Express*, 2012, 20(9): 9890-9896.

- 5 Dong Jianji, Zhang Xinliang, Shen Ping, *et al.*. High speed wavelength conversion and format conversion based on semiconductor optical amplifier and optical filter[J]. Chinese J Lasers, 2007, 34(7): 940-944.  
董建绩, 张新亮, 沈平, 等. 利用半导体光放大器 and 滤波器组合实现高速波长转换和码型转换[J]. 中国激光, 2007, 34(7): 940-944.
- 6 Liang Wang, Yongheng Dai, Gordon K P Lei, *et al.*. All-optical RZ-to-NRZ and NRZ-to-PRZ format conversions based on delay-asymmetric nonlinear loop mirror[J]. IEEE Photon Technol Lett, 2011, 23(6): 368-370.
- 7 Lei Xu, Bing C Wang, Varghese Baby, *et al.*. All-optical data format conversion between RZ and NRZ based on a Mach-Zehnder interferometric wavelength converter[J]. IEEE Photon Technol Lett, 2003, 15(2): 308-310.
- 8 Chen Xin, Lou Caiyun, Wang Qiang, *et al.*. Investigation of all optical 2R regeneration based on semiconductor optical amplifier[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(9): 0906013.  
陈新, 娄采云, 王强, 等. 基于半导体光放大器光判决门的光2R再生研究[J]. 光学学报, 2013, 33(9): 0906013.
- 9 Hui Zhanqiang. Progress on all-optical RZ-to-NRZ code conversion techniques[J]. Laser & Infrared, 2011, 41(5): 492-500.  
惠战强. 全光归零(RZ)到非归零(NRZ)码型转换技术研究进展[J]. 激光与红外, 2011, 41(5): 492-500.
- 10 Wei Liping, Wang Yonghua, Zang Junbin, *et al.*. Analysis and optimum design of silicon-on-insulator micro-ring resonator[J]. Acta Photonica Sinica, 2013, 42(12): 1473-1477.  
韦丽萍, 王永华, 臧俊斌, 等. 绝缘体上硅微环谐振腔电光调制器的分析与最优设计[J]. 光子学报, 2013, 42(12): 1473-1477.
- 11 Liu Yi, Tong Xiaogang, Yu Jinlong, *et al.*. All-optical switching in silicon-on-insulator serially coupled double-ring resonator based on thermal nonlinear effect[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(2): 0205006.  
刘毅, 仝晓刚, 于晋龙, 等. 基于热非线性效应的硅基串联双微环谐振腔全光开关[J]. 中国激光, 2013, 40(2): 0205006.
- 12 Han Xiuyou, Wang Linghua, Wang Yu, *et al.*. Research of notch filter based on polymer micro-ring waveguide[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(7): 0706006.  
韩秀友, 王凌华, 王瑜, 等. 聚合物波导微环陷波滤波器研究[J]. 光学学报, 2013, 33(7): 0706006.
- 13 Wang Yuanwu, Zhang Minming, Xia Li, *et al.*. Progress in dispersion control of micro-ring resonator-based optical frequency comb generation[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(6): 060001.  
王元武, 张敏明, 夏历, 等. 基于微环谐振腔产生光频梳的色散控制的研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(6): 060001.
- 14 Ren Yan, Song Muping. Optical NRZ-to-RZ modulation format conversion based on cross-phase modulation effects in silicon micro-ring resonator[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(7): 0706002.  
任艳, 宋牟平. 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[J]. 光学学报, 2013, 33(7): 0706002.
- 15 Yunhong Ding, Christophe Peucheret, Minhao Pu, *et al.*. RZ-to-NRZ format conversion at 50 Gbit/s based on a silicon microring resonator[J]. Opto Electronics and Communications Conference (OECC'2010), 2010. 862-863.
- 16 Yunhong Ding, Christophe Peucheret, Minhao Pu, *et al.*. Multi-channel WDM RZ-to-NRZ format conversion at 50 Gbit/s based on single silicon microring resonator[J]. Opt Express, 2010, 18(20): 21121-21130.
- 17 Meng Xiong, Oskars Ozolins, Yunhong Ding, *et al.*. Simultaneous RZ-OOK to NRZ-OOK and RZ-DPSK to NRZ-DPSK format conversion in a silicon microring resonator[J]. Opt Express, 2012, 20(25): 27263-27272.
- 18 Cao Jianqiu, Lu Qisheng. Influence of higher-order dispersion on super-Gaussian optical pulse in the single-mode optical fiber[J]. Laser Technology, 2006, 30(2): 209-211.  
曹涧秋, 陆启生. 单模光纤中高阶色散对超高斯光脉冲传播的影响[J]. 激光技术, 2006, 30(2): 209-211.
- 19 Zheng Hongjun, Liu Shanliang, Li Xin, *et al.*. Autocorrelation characteristics of super-Gaussian optical pulse[J]. Chinese J Lasers, 2007, 34(7): 908-914.  
郑宏军, 刘山亮, 黎昕, 等. 超高斯光脉冲自相关特性[J]. 中国激光, 2007, 34(7): 908-914.
- 20 Wang Wenrui, Yu Jinlong, Yang Enze, *et al.*. Analysis of DOP-DGD for sequence of Gaussian pulses[J]. Acta Photonica Sinica, 2007, 36(2): 275-278.  
王文睿, 于晋龙, 杨恩泽, 等. 光纤中高斯型伪随机序列码偏振度的理论分析和实验研究[J]. 光子学报, 2007, 36(2): 275-278.
- 21 Ding Yunhong. Research on Microring Resonators and Their Applications in All Optical Signal Processing[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2011. 16-26.  
丁运鸿. 微环谐振器及其在全光信号处理中的应用[D]. 武汉: 华中科技大学, 2011. 16-26.
- 22 Arthur B Williams, Fred J Taylor. Electronic Filter Design Handbook (4th edition) [M]. Ning Yanqing, Yao Jingke, Transl. Beijing: Science Press, 2008. 30-44.  
亚瑟, 弗雷德. 电子滤波器设计(第四版)[M]. 宁彦卿, 姚金科, 译. 北京: 科学出版社, 2008. 30-44.
- 23 Liu Wenkai, Zhao Ranyue, Dong Xiaowei. Design of series-coupled Chebyshev microring filters[J]. Acta Photonica Sinica, 2014, 43(3): 0313003.  
刘文楷, 赵冉月, 董小伟. 串联耦合切比雪夫微环滤波器的设计[J]. 光子学报, 2014, 43(3): 0313003.