

# 全光非归零(NRZ)到归零(RZ)码型转换技术研究进展

惠战强<sup>1</sup> 张建国<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 西安邮电大学电子工程学院, 陕西 西安 710061  
<sup>2</sup> 中国科学院西安光学精密机械研究所瞬态光学与光子技术国家重点实验室, 陕西 西安 710119

**摘要** 互联网业务的迅猛增长,促使光网络向大容量高性能方向发展,波分复用(WDM)与时分复用(OTDM)相结合,将是未来超高速大容量光子网络的发展方向。全光非归零(NRZ)到归零(RZ)码型转换技术,是构建这种WDM/OTDM混合网络的核心接口技术之一,它能够将分别采用WDM与OTDM技术的不同网络部分有机结合,实现不同调制格式的数据在网络的不同区域之间自由传输。综述了全光NRZ到RZ码型转换技术的最新研究进展,详细分析了每种方案的工作原理,性能特征及关键技术,对比了其优缺点,指出了目前存在的问题,最后对其发展前景进行了展望。

**关键词** 光通信;全光网络;码型转换;非归零码;归零码;全光信号处理

**中图分类号** TN913.7 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP49.060003

## Recent Progress in All-Optical NRZ-to-RZ Format Conversion

Hui Zhanqiang<sup>1</sup> Zhang Jianguo<sup>2</sup>

<sup>1</sup> School of Electronic Engineering, Xi'an University of Posts and Telecommunications,  
Xi'an, Shaanxi 710061, China

<sup>2</sup> State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics, Xi'an Institute of Optics and Precision  
Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an, Shaanxi 710119, China

**Abstract** With the rapid growth of internet business, optical networks will require better performance and higher capacity. Future optical networks are likely a hybrid of wavelength division multiplexing (WDM) and optical time division multiplexing (OTDM) by combining the advantages of both technologies. All-optical non-return-to-zero (NRZ) to return to zero (RZ) format conversion, which can enable data with different modulation format to transmit in different region of network freely, is one of the key interface techniques of constructing this hybrid network. The research progress of all-optical NRZ to RZ format conversion is introduced. And the operation principle, characteristics, performance are analyzed in detail. Also the advantages and disadvantages of these methods are listed. Finally, the future development is prospected.

**Key words** optics communications; all-optical network; format conversion; non-return-to-zero; return to zero; all optical signal processing

**OCIS codes** 060.1155; 060.2330; 060.2340; 070.4340

## 1 引言

光时分复用(OTDM)与波分复用(WDM)是光纤通信系统中两种最主要的信号复用方式,前者以其单波可实现超高速传输的特点主要用于长距离主干网中,其主要特点为普遍采用归零码(RZ)格式,因为其具有小的占空比,较高的偏振模色散容限,良好的抗线路非线性损伤能力,非常适用于高速率长距离传输;后者

**收稿日期**: 2011-10-21; **收到修改稿日期**: 2011-12-15; **网络出版日期**: 2012-04-01

**基金项目**: 中国科学院“知识创新”工程(KGCX2-YW-108)和陕西省教育厅项目(11JK0901)资助课题。

**作者简介**: 惠战强(1978—),男,博士,讲师,主要从事光纤通信与超快全光信号处理等方面的研究。

E-mail: zqhui@opt.ac.cn

**导师简介**: 张建国(1964—),男,研究员,博士生导师,主要从事超宽带光学测量仪器设备与超快全光信号处理技术等方面的研究。E-mail: zhangjg@opt.ac.cn

以其具有紧密的波长通道间距、较低的比特率和对电子器件的友好性等点,主要用于城域网和接入网中,主要特点为采用非归零码(NRZ)格式,因为其具有较高的光谱效率、较强的时间抖动和色散容忍度。但是,为了满足不断出现的各种多媒体业务,如电子商务、网络医疗和视频会议等对网络带宽的迫切需求,未来的光网络必然采用时分复用与波分复用相结合的系统结构,以便充分利用两种技术的优点,组建智能化的超高速大容量光子网络<sup>[1]</sup>。在这样的 OTDM/WDM 混合系统中,网络的不同部分将具有不同的信号调制格式,因此,能够有机的将光网络中的不同部分(广域网/城域网/接入网)相结合的全光网络接口技术日益成为研究热点,引起人们广泛关注<sup>[2]</sup>。

全光 NRZ 到 RZ 的码型转换技术就是上述全光网络接口的关键技术之一,它能够突破传统电子学器件的工作速率极限,在光域内将适用于在城域网和接入网中传输的 NRZ 码转换为适于在主干网中传输的 RZ 码,从而完成从波分复用到时分复用的转换<sup>[3]</sup>,具有重要的实用价值。然而,由于全光 NRZ 到 RZ 码型变换属于光网络中的全光信号处理范畴,是随着透明光子网络的提出与深入发展而出现的,因此目前仍处于起始阶段,但由于其在未来超高速大容量光子网络中的关键性作用,国内外很多研究机构,包括美国贝尔实验室、普林斯顿大学、法国阿尔卡特、日本大阪大学、香港中文大学、清华大学和华中科技大学等都投入大量人力物力,开展积极探索,研究成果也日新月异。本文首先详细介绍了目前全光 NRZ 到 RZ 码型转换技术的最新进展,分析了它们的工作原理、特点及关键技术,其次从比特率透明性、偏振敏感性、信号再生性、系统级联性和波长转换性五方面对各种方案的性能进行了对比,最后对全光 NRZ 到 RZ 码型转换技术的存在问题进行讨论,对发展前景做了展望。

## 2 全光 NRZ 到 RZ 码型转换技术新进展

当前在实现全光 NRZ 到 RZ 码的各种码型转换方案中,其原理主要都是利用各种二阶或三阶光学非线性效应,包括二次谐波产生、交叉相位调制、交叉增益调制、交叉偏振调制和四波混频效应等,所涉及的非线性器件有硅纳米线、微环谐振器、色散平坦高非线性光子晶体光纤、周期极化铌酸锂(PPLN)波导、色散位移高非线性光纤、半导体光放大器、注入锁定 F-P 激光器、非线性光纤环形镜(NOLM)和光纤延时马赫-曾德尔干涉仪等。

### 2.1 基于硅基纳米光子器件的码型转换技术

硅基光子器件的最大优点在于与现有的集成电路半导体工艺兼容,能够将不同类型的有源无源器件集成在同一个芯片上,实现单片集成,从而制作小型化、集成化和低成本的光子器件,进而极大发挥光子的信息并行处理能力,因此多年来备受关注,研究现状方兴未艾<sup>[4]</sup>。硅基微环谐振器和硅纳米线是硅基光子器件的典型代表,人们已经基于它们实现了各种全光信号处理功能。

#### 2.1.1 基于硅基微环谐振器的码型转换技术

硅基微环谐振器具有尺寸小、插损低和易于集成等优点,甚至可以利用其作为基本元件,构成半导体激光器、光波导滤波器以及光波导调制器,进而形成大规模集成光路等,因此自问世以来发展迅速。目前,人们已实现了基于硅基微环谐振器的全光逻辑门<sup>[5]</sup>、波长转换器<sup>[6]</sup>、码型变换器<sup>[7]</sup>和光缓存器<sup>[8]</sup>、光调制器<sup>[9]</sup>等多种硅基光子功能器件。

图 1(a)是硅基微环谐振器的光学显微照片,其中微环半径  $25\ \mu\text{m}$ ,波导宽  $0.4\ \mu\text{m}$ ,高  $0.21\ \mu\text{m}$ ,刻蚀深度  $0.18\ \mu\text{m}$ 。图 1(b)是基于微环谐振器的全光 NRZ 到 RZ 码型转换原理图<sup>[10]</sup>。实验中将一个横向 PIN 二极管管理入整个微环中,依据等离子体色散效应,当改变二极管上的偏压时,可使谐振器电光共振参数灵活调谐。这种码型转换方案的基本思想是通过频域的光谱剪裁变换实现时域的脉冲宽度变换,从而完成码型转换。具体过程为:波长可调谐激光器发出的一束连续光被发射机调制为 NRZ 码,此 NRZ 信号在频域必然表现为光谱中心两侧伴有高阶边带,经过功率放大和偏振调节以后,此 NRZ 码光信号进入带有透镜的保偏单模光纤,由透镜耦合进硅基微环谐振器,经谐振器透射的光由一个物镜收集,再经一个透镜耦合进另一段单模光纤,进一步功率放大和滤波后,可得 RZ 码。由于谐振器特有的传输特性,其透射谱呈现周期性结构,如果调节信号的中心波长恰好处于微环谐振器透射极小值,边带处于极大值,则可以在频域抑制了光谱的中心成分,增强了边带成分,对应的时域脉冲变窄,从而完成码型转换功能。

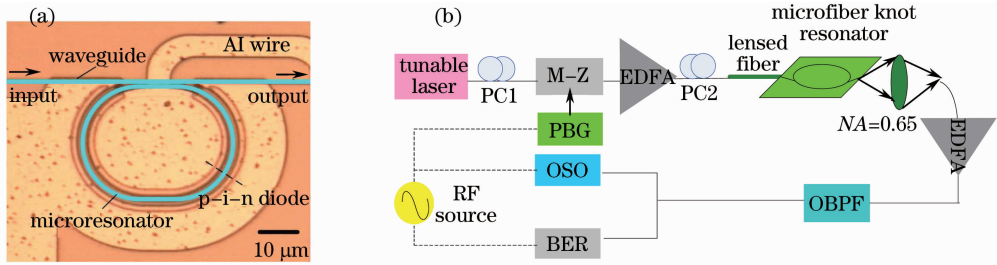


图 1 (a) 硅基微环谐振器;(b) 基于硅基微环谐振器的 NRZ 到 RZ 码型转换原理图

Fig. 1 (a) Si-based micro-ring resonator and (b) format conversion principle from NRZ to RZ based on Si-based micro-ring resonator

### 2.1.1 基于硅纳米线的码型转换技术

硅纳米线的扫描电镜照片如图 2(a)所示,实现码型转换实验装置如图 2(b)<sup>[11]</sup>所示。NRZ 信号由光发射机产生,此发射机由一个外腔激光器和一个铌酸锂电光调制器组成,调制速率为 10 Gb/s。由于实验过程中缺乏 10 Gb/s 的抽运脉冲信号,便由一个 40 Gb/s 的锁模激光器和一个 40 Gb/s 的电光调制器级联后充当,通过设计比特序列为“1000”,可以使此 40 Gb/s 信号充当 10 Gb/s 的抽运信号,自相关曲线表明此方法获得的抽运信号脉宽仅 2.7 ps,能够完成 NRZ 到 RZ 码型转换。NRZ 信号与短脉冲抽运信号分别经过功率放大和偏振调节后,两束光由 9:1 的 2×1 耦合器耦合进入硅纳米线,抽运光从 90% 端口输入,以确保在硅纳米线中产生足够强的交叉相位调制效应,偏振控制器用来确保两束光偏振态一致,以使同等的输入功率下,交叉相位调制效果最佳,抽运信号支路中的可调光延时线被用来确保抽运脉冲与 NRZ 脉冲信号的中心同步,波长固定的光纤布拉格光栅被用来滤出交叉相位调制的展宽光谱带信号,此光栅中心波长偏离探测光波长 0.35 nm,被抑制掉的探测光从光环形器的 3 端口输出。从光纤布拉格光栅透射的信号经过一个 0.3 nm 带宽光滤波器后被注入预放大接收系统,完成眼图监测和误码测试,实验证明获得了无误码 NRZ 到 RZ 码型转换。

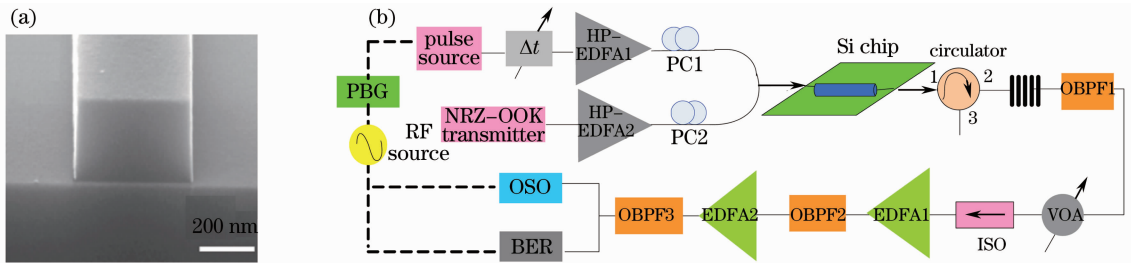


图 2 (a) 硅纳米线照片,(b) 基于硅纳米线的 NRZ 到 RZ 码型转换原理

Fig. 2 (a) Si nanowire, (b) format conversion principle from NRZ to RZ based on Si nanometer wire

## 2.2 基于色散平坦高非线性光子晶体光纤的码型转换技术

光子晶体光纤(PCF)是一种具有光子带隙结构的新型光纤,具有传统光纤所不具备的诸多独特优势,非常适合用做全光信号处理介质。从结构上来讲,它由在二维方向上紧密排列的微孔组成,通过改变空气孔的形状和尺寸,可以灵活地控制模式传输特性<sup>[12]</sup>,从而设计制作出具有色散平坦和高非线性系数的光纤,进而可以利用较短的光纤长度,在较宽的波长范围内满足相位匹配,产生较强的非线性效应,实现宽带工作。基于光子晶体光纤中的非线性效应实现 NRZ 到 RZ 码型转换可以分为三种,分别是基于自相位调制、交叉相位调制和四波混频效应,下面分别予以阐述。

### 2.2.1 基于 PCF 中自相位调制效应的码型转换

基于光子晶体光纤中自相位调制效应实现 NRZ 到 RZ 码型转换所用光纤由丹麦 Crystal Fiber 公司提供,横截面如图 3(a)所示,码型转换实验原理如图 3(b)<sup>[13]</sup>所示,增益开关激光器发出波长为 1551 nm 的信号光,随后被马赫-曾德尔调制器调制,产生重复频率为 9.95 GHz 的伪随机光脉冲序列。掺铒光纤放大器用来放大经过调制的信号,偏振控制器用来控制进入调制器的信号光偏振方向与调制器匹配,以使调制状态最佳。随后进入 41 m 色散平坦高非线性光子晶体光纤。由于信号光功率较大,在非线性光纤中发生自相

位调制作用,导致连续光光谱展宽,在光子晶体光纤的另一端,用一个带宽 0.4 nm 的光纤布拉格光栅滤出展宽的连续光谱边带,抑制掉不需要的中心光谱分量,便得到了时域的归零码,此方案的优点是结构简单,性能可靠,转换信号性能好,且不需要其它外部光源。

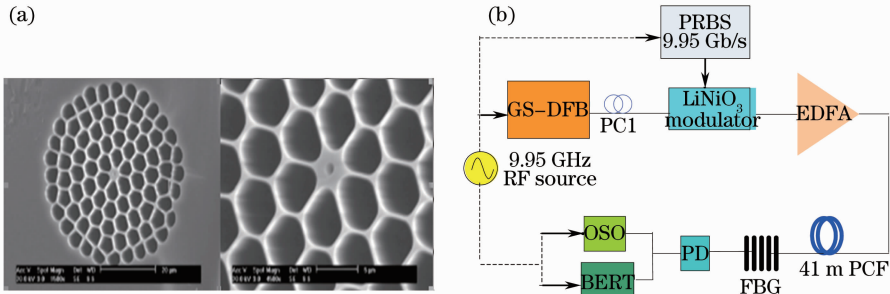


图 3 (a)PCF 电镜照片;(b)基于 PCF 中自相位调制效应的 NRZ 到 RZ 码型转换原理图

Fig. 3 (a) SEM photo of PCF and (b) format conversion principle from NRZ to RZ based on cross-phase modulation in PCF

### 2.2.2 基于 PCF 中交叉相位调制效应的码型转换

基于光子晶体光纤实现 NRZ 到 RZ 码型转换的实验原理如图 4(a)<sup>[13]</sup>所示。NRZ 信号的产生装置与上述基于自相位调制的码型转换方法完全相同,信号中心波长是 1551 nm。脉冲信号由另一个增益开关激光器发出,波长为 1549.5 nm,重复频率为 9.95 GHz,此脉冲随后进入 700 m 色散补偿光纤,经补偿后,测得脉冲半高全宽为 14.5 ps。掺铒光纤放大器用来放大经过压缩的脉冲信号,使其峰值功率达到 1 W,NRZ 信号(波长 1551 nm)和脉冲信号(波长 1549.5 nm)分别经过两个偏振控制器后经 2×1 耦合器耦合,后进入 64 m 色散平坦高非线性光子晶体光纤。偏振控制器用来控制进入调制器的信号光偏振方向与调制器匹配,以使调制状态最佳,此光纤型号与上述基于自相位调制的码型转换方案相同。由于脉冲抽运光具有较强的峰值功率,在非线性光纤中发生交叉相位调制作用,导致 NRZ 信号光谱展宽,在光子晶体光纤的另一端,用一个带宽 2 nm 的光纤布拉格光栅滤出展宽的光谱边带,抑制掉不需要的归零码信号光谱,便得到了时域的归零码,此方案的优点是在码型转换的同时实现了波长变换。

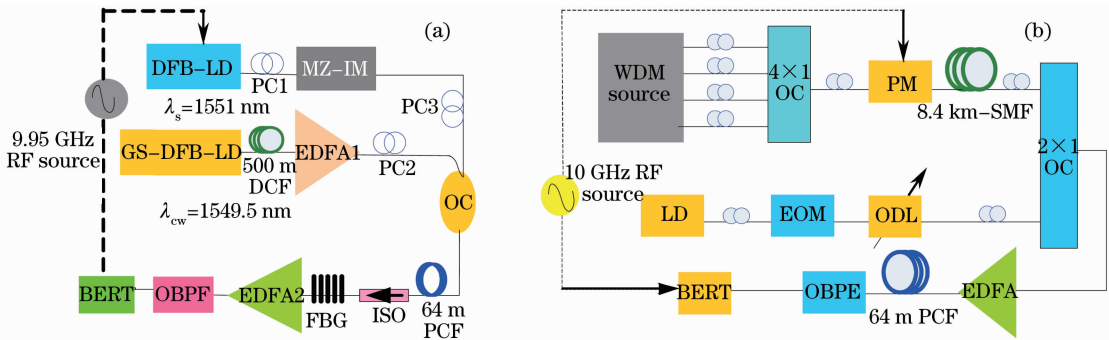


图 4 基于 PCF 中(a)交叉相位调制效应和(b)四波混频效应的 NRZ 到 RZ 码型转换图

Fig. 4 Format conversion principle from NRZ to RZ based on (a) cross phase modulation and (b) four wave mixing in PCF

### 2.2.3 基于 PCF 中四波混频效应的码型转换

基于四波混频效应实现码型转换的实验装置,如图 4(b)<sup>[14]</sup>所示。波长间距为 1.25 nm 的四路连续光由 WDM 光源产生,经耦合后输入一个相位调制器,相位调制器由 10 GHz 的射频(RF)信号驱动,其作用是对信号进行调制,以在连续光的频谱上产生啁啾。经过相位调制的四路信号随后被输入 8.4 km 单模光纤,光纤中的群速度色散效应使四束连续光被压缩为四路脉冲信号,相邻通道间距是 25 ps,这可由通道波长间距和单模光纤的色散参数决定。因此便在单模光纤输出端得到了 40 GHz 波长和时间均错开的脉冲信号,数据信号由 10 GHz 电光调制器对波长可调谐连续光源发出的连续光信号调制产生,两路信号经光耦合器耦合进入掺铒光纤放大器,将其功率放大以确保在随后的光子晶体光纤中产生四波混频效应。数据信号充当抽运光,四路探测信号处于抽运光波长一侧,经过四波混频效应,便在抽运光波长另一侧得到相应四个新的光谱分量,波长间距仍为 1.25 nm,将其滤出,便得到了转换后的 RZ 信号,这种方法的优点是不仅在码型



转换的同时完成了波长换转,而且转换的 RZ 信号脉宽可调谐,并且对信号的调制格式和比特率透明。

### 2.3 基于周期极化铌酸锂波导的码型转换技术

准相位匹配技术是指通过人为的将晶体设计成周期性结构,以满足相位匹配条件,提高二次谐波转换效率<sup>[15]</sup>。周期极化铌酸锂(PPLN)波导是一种典型的准相位匹配晶体,具有二阶非线性系数高、响应速度快和易实现太赫兹调制带宽等优点,近年来得到广泛研究。利用 PPLN 波导中的和频/差频效应,人们已经实现了全光开关<sup>[16]</sup>、全光逻辑门<sup>[17]</sup>、全光波长转换器<sup>[18]</sup>、光学相位共轭<sup>[19]</sup>和全光码型转换器<sup>[20]</sup>等全光信号处理器件。

基于周期极化铌酸锂波导实现 NRZ 到 RZ 码型转换的实验原理如图 5<sup>[21]</sup>所示,整个结构由 NRZ 信号发生器、NRZ 到 PRZ 码型转换器、全光时钟恢复模块、NRZ 到 RZ 码型转换器四部分组成。伪随机 NRZ 信号由可调谐激光器、马赫-曾德尔调制器、伪随机码型发生器、可调谐频率合成器及掺铒光纤放大器组成,此 NRZ 信号含有较弱的时钟分量,为了实现 NRZ 到 RZ 码型转换,首先需要增强时钟分量。因此将此信号一分为二,一部分注入 NRZ 到 PRZ 码型转换器,另一部分注入第四部分留作 NRZ 到 RZ 码型转换用。NRZ 到 PRZ 码型转换器由光纤延时干涉仪组成,它由 2 个 3 dB 耦合器和 2 个干涉臂组成,2 个臂长度为 5.2 mm,等价于 25 ps 的时间差,其中一臂的相移可以通过温度控制来改变。转换得到的 PRZ 信号被注入反射型半导体光放大器基的主动锁模光纤激光器实现时钟分量提取,此时钟提取模块由可调光衰减器、3 dB 耦合器、偏振控制器、反射型半导体光放大器、环形器、延时干涉仪、隔离器、可调滤波器及 1:9 耦合器组成。反射型半导体光放大器既为环形腔提供增益,又在腔内起到交叉增益调制效应,光延时线用来改变腔长,隔离器用来保证信号单向传输,通过调节可调滤波器,光延时线等可使环形腔满足谐波锁模条件,于是在不同于原始信号的波长处得到提取的时钟分量。提取的时钟分量( $\lambda_p$ )与原始 NRZ 信号( $\lambda_s$ )耦合,注入 NRZ 到 RZ 码型转换模块,此模块由高功率掺铒光纤放大器、偏振控制器和周期极化铌酸锂波导组成,实验中所用波导长 50 mm,通过电场极化和质子交换退火技术制作而成,调节抽运光处在波导的二次谐波产生准相位匹配波长处。当此抽运光在波导中传输时,通过二次谐波效应,产生二次谐波,同时,由于差频效应,二次谐波与信号产生了闲频波,只有当信号与抽运波同时存在时,才能产生闲频波,因此,完成了 NRZ 到 RZ 的码型转换。

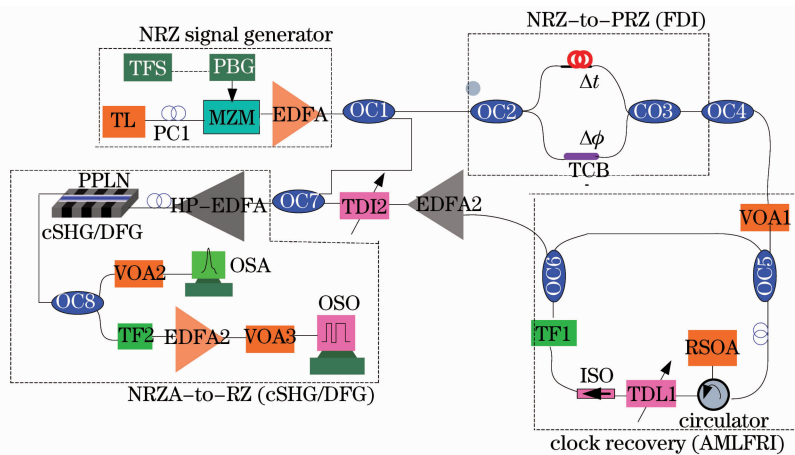


图 5 基于 PPLN 中 SHG/DFG 效应的 NRZ 到 RZ 码型转换原理图

Fig. 5 Format conversion principle from NRZ to RZ based on SHG/DFG effect in PPLN

### 2.4 基于半导体光放大器的码型转换技术

半导体光放大器以其非线性系数高、尺寸小、功耗低和易于集成等优点被广泛用于全光信号处理领域,其形貌如图 6(a)所示。基于半导体光放大器,人们已经实现了全光波长转换<sup>[22]</sup>、全光时分解压缩<sup>[23]</sup>、全光逻辑门<sup>[24]</sup>、全光加法器<sup>[25]</sup>、全光触发器<sup>[26]</sup>和全光码型变换<sup>[27]</sup>等多种功能。基于半导体光放大器的全光 NRZ 到 RZ 码型转换技术主要有基于半导体光放大器级联滤波器结构、基于四波混频和交叉偏振调制效应三种,下面分别阐述。

#### 2.4.1 基于半导体光放大器级联滤波器的码型转换技术

此实验主要由半导体光放大器级联滤波器组成,具体过程如图 6(b)所示<sup>[28]</sup>。波长为  $\lambda_s$  的 NRZ 信号,

与波长为  $\lambda_p$  的时钟控制信号同步,二者经合束后,注入半导体光放大器,在其中发生交叉相位调制效应,峰值功率较高的控制光改变了半导体光放大器有源区内的载流子浓度,使得 NRZ 信号光产生瞬态啁啾,脉冲上升沿红移,下降沿蓝移,对应光谱展宽,随后采用窄带宽的滤波器对准 NRZ 信号对应展宽光谱的边带部分,滤出边带光谱分量,则得到码型转换信号,通过适当调谐滤波器中心波长偏离  $\lambda_s$ ,可以优化转化后的 RZ 信号消光比。此方案的优点是结构简单、响应速率高,当使用偏振不敏感半导体光放大器时,整个系统可实现偏振不敏感工作。

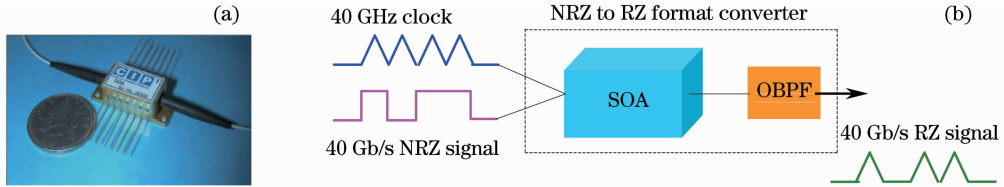


图 6 (a) 半导体光放大器形貌和 (b) 基于半导体光放大器级联滤波器的 NRZ 到 RZ 码型转换原理

Fig. 6 (a) SEM photo of SOA and (b) Format conversion principle from NRZ to RZ based on semiconductor optical amplifier

#### 2.4.2 基于半导体光放大器中交叉偏振调制效应的码型转换技术

此方案的原理是利用交叉偏振调制效应,即当外部信号光与抽运光同时注入半导体光放大器时,由于半导体光放大器所特有的双折射效应,信号光被分解为 TE 和 TM 两个互相垂直的偏振分量,调节半导体光放大器后的偏振控制器,使无抽运光输入时,偏振器后获得输出光信号最弱;当有抽运光输入时,抽运光导致半导体光放大器有源区内载流子耗尽,进而导致偏振相关的折射率系数变化,最终导致 TE 和 TM 分量获得不同的相移,两个偏振分量获得了一个净相移差,导致信号光偏振态发生旋转,使得此时有信号光输出,但由于抽运光脉宽较短,所以输出的信号光虽然与原始信号数据相同,但脉宽变短,即转换为 RZ 信号。

具体实验装置如图 7(a)<sup>[29]</sup> 所示, NRZ 数据信号(探测光)速率为 42.6 Gb/s,中心波长为  $\lambda_s$ ,时钟信号(抽运光)波长为  $\lambda_c$ ,调制速率为 42.6 Gb/s,使用一个可调谐光延时线对二者进行同步,并经过耦合后注入半导体光放大器,时钟信号脉宽仅 3 ps,随后经过带宽为 0.4 nm 的滤波器滤出经过交叉偏振调制的信号,并抑制自发辐射噪声,滤波器的中心波长仍为  $\lambda_s$ ,此信号注入第二个半导体光放大器,在第二个半导体光放大器中经历放大后,随后使用一个带宽 0.46 nm 的滤波器对准  $\lambda_s$  的波长,滤出码型转换信号,此信号与原始 NRZ 码信号波长相同,但由于在第一个半导体光放大器中经历了交叉偏振调制效应,又经历了第二个半导体光放大器的整形,已经转换为 RZ 码,实现了码型转换。此方案的关键在于合理控制进入第一个半导体光放大器的输入抽运光功率,一方面功率不能太小,以免探测光不能获得足够的非线性偏振旋转,另一方面又不能太大,以免非线性偏振旋转过大,甚至有可能损坏半导体光放大器。这种方法具有结构简单,性能可靠,且能突破载流子恢复时间的优点。

#### 2.4.3 基于半导体光放大器中四波混频效应的码型转换技术

这种方案的原理是基于半导体光放大器中的四波混频作用<sup>[30]</sup>,目前已经分别实现了 20 Gb/s 和 40 Gb/s

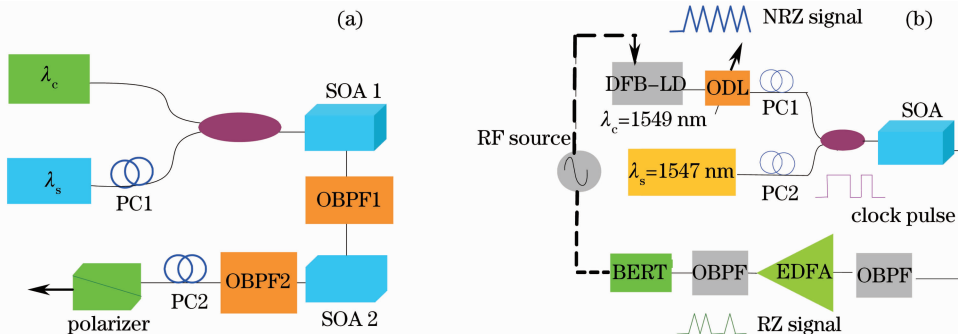


图 7 基于半导体光放大器中 (a) 交叉偏振调制效应和 (b) 四波混频效应的 NRZ 到 RZ 码型转换原理

Fig. 7 Format conversion principle from NRZ to RZ based on (a) cross polarization modulation and (b) four-wave mixing in semiconductor optical amplifier

的单到双码型转换<sup>[31]</sup>。具体实验装置如图 7(b)所示,波长为  $\lambda_s$  经过调制的 NRZ 数据信号光,与波长为  $\lambda_c$  的时钟信号耦合后同时注入半导体光放大器,由于四波混频作用,在数据信号和时钟信号两侧分别产生两个边带,对应波长为  $\lambda_{\text{left}} = 2\lambda_s - \lambda_c$ ,  $\lambda_{\text{right}} = 2\lambda_c - \lambda_s$ ,由于四波混频是一个幅度和相位保持的过程,此码型转换器的原理类似于基于半导体光放大器中四波混频效应的逻辑“与”门,可以将时钟信号看做比特全“1”的 RZ 信号,因此,在“与”门的作用下,输出信号与输入信号含有相同的信息,只是全部转换为 RZ 信号,如果将两个光谱边带滤出,则可以实现 NRZ 到 RZ 码型转换。此方案的优点是对比特率和调制格式透明,码型转换的同时实现了波长转换,并且,波长转换具有一到二的信息组播功能。

## 2.5 基于高非线性色散位移光纤的码型转换技术

色散位移光纤是一种拉制工艺成熟的传统光纤,多年来一直被用于光纤通信和光信号处理领域,它的最大特点是与现有的光纤通信系统兼容。基于色散位移光纤的 NRZ 到 RZ 码型转换技术早期主要是基于高非线性色散位移光纤中的四波混频,后来发展到利用其内部的自(或交叉)相位调制、交叉偏振调制等。

### 2.5.1 基于色散位移光纤中相位调制的码型转换技术

这种方案是利用相位调制光谱展宽的原理,结合光纤色散导致在其中传输的脉冲展宽特性,将光谱的边带部分滤出来实现的,进一步可分为基于自相位调制和交叉相位调制两种<sup>[32]</sup>。实验原理与基于光子晶体光纤中相位调制实现 NRZ 到 RZ 的码型转换实验装置类似。

### 2.5.2 基于高非线性色散位移光纤中交叉偏振调制的码型转换技术

这种方案的本质是通过交叉偏振调制效应对 NRZ 信号实现波长转换,将波长转换后并带有预啁啾的 NRZ 信号输入色散补偿光纤,由于色散压缩效应,在色散补偿光纤中完成了 NRZ 到 RZ 的码型转换功能。进一步将转换的 RZ 信号与另一束连续光同时注入色散位移高非线性光纤,若设置此连续光的波长与最初信号光波长一致,则发生第二次基于交叉偏振调制效应的波长转换,信号光又回到了原波长上,但原 NRZ 码型已经转换为 RZ 码。整个装置完成了两个功能,第一,实现了 NRZ 到 RZ 的码型转换,第二,整个装置具有光延时线的功能。具体实验装置如图 8<sup>[33]</sup>所示,波长为 1570 nm 的信号光经过相位调制后,注入掺铒光纤放大器,相位调制的目的是展宽信号光光谱,以避免在随后的非线性光纤中发生受激布里渊散射效应,探测光由可调谐激光器和相位调制器产生,相位调制器上加载 10 GHz 正弦信号,目的是保证探测光与信号光同步,分别进行功率放大后,注入一段高非线性色散位移光纤,在其中发生交叉偏振调制效应,在输出端用波分解复用器提取出探测光,并用偏振分束器进一步将偏振调制转换为强度调制,后将其注入一段色散补偿光纤,在色散补偿光纤中完成脉冲压缩,再经过相位调制(作用同前,避免第二次经过高非线性光纤时发生受激布里渊散射效应)和功率放大后,与另一束波长为 1570 nm 的连续光耦合,重新注入高非线性色散位移光纤,在其中再次发生交叉偏振调制效应,在环形器 1(CIR1)的端口 3 得到波长为 1670 nm 的信号,随后的检偏器将偏振调制转换为强度调制,完成了 NRZ 到 RZ 的码型转换。此方案中影响码型转换优劣的关键参数是色散补偿光纤的色散参数以及信号的初始啁啾,实验中应合理选择,使输出 NRZ 质量最好。

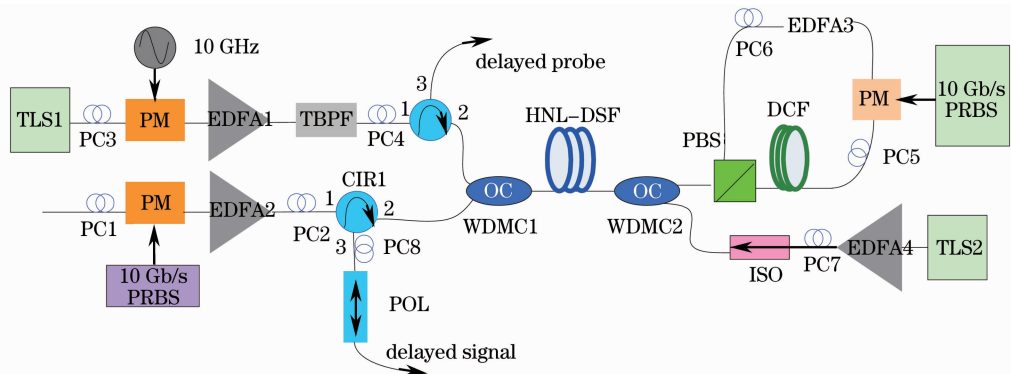


图 8 基于色散位移光纤中交叉相位调制效应的 NRZ 到 RZ 码型转换原理图

Fig. 8 Format conversion principle from NRZ to RZ based on cross-phase modulation in dispersion-shifting fiber



### 2.5.3 基于高非线性色散位移光纤中四波混频效应的码型转换技术

其原理与基于半导体光放大器中的四波混频效应实现 NRZ 到 RZ 的原理基本相似,主要差别为将非线性介质代以光纤。实验过程如图 9<sup>[34]</sup>所示:两个激光器分别发出波长为  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  的连续光,其中  $\lambda_1$  是高非线性光纤的零色散波长。两束连续光经过调制器后变为脉冲序列,两束脉冲的相对延时由可调谐电延时线控制,分别经过功率放大和偏振调节后,被注入进 1 km 色散位移高非线性光纤,其非线性系数是  $9.1 \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ ,偏振控制器用来确保相同功率下四波混频效应最强。由于四波混频效应导致闲频光波出现,光谱上必然表现为,在输入两束光对应波长的两侧出现两个边带,当用一个滤波器滤出此光谱分量,则得到转换后的 RZ 信号,通过调节两路输入信号的相对延时,可以实现输出脉宽调谐的目的。

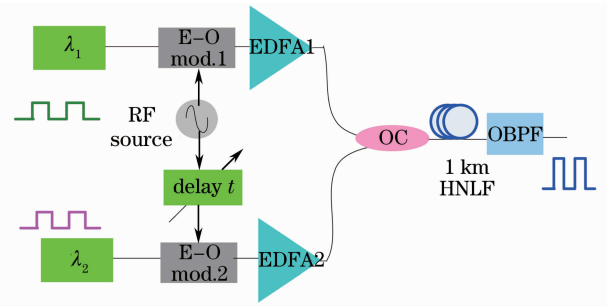


图 9 基于色散位移光纤中四波混频效应的 NRZ 到 RZ 码型转换原理图

Fig. 9 Format conversion principle from NRZ to RZ based on four-wave mixing in dispersion-shifting fiber

### 2.6 基于注入锁定 FP 激光器的码型转换技术

此方案的核心是依赖两个 F-P 激光器<sup>[35]</sup>,其模间距近似相等约 1.68 nm,中心输出波长 1543 nm,输出功率 2 mW。具体原理如图 10 所示,探测光由一个分布反馈激光器产生,波长为  $\lambda_p$ ,另一个波长为  $\lambda_s$  的分布反馈激光器发出连续光信号,经过调制得到 10 GHz 抽运信号,探测信号和抽运信号耦合后注入环形器,随后又注入偏振分束器,偏振分束器将入射信号分解为互相垂直的两个偏振分量。偏振控制器 1 的作用是确保探测光与偏振分束器主轴成  $45^\circ$ ,以使两分解的线偏振光功率相等。偏振控制器 2 的作用是调整抽运光偏振态,以使调制效果最佳,偏振控制器 3 和 4 的作用是使得从偏振分束器端口 B 和 C 出来的线偏光分别与 FP-1 和 FP-2 的横电场相匹配,即保证注入两个 FP 激光器的光都是 TE 偏振的,可调光延时线用来调整进入两个 FP 激光器的信号的相对时延。探测光波长初始设置为处在 FP 激光器模式长波长一边,因此没有注入锁定现象发生,当注入 NRZ 抽运信号时,便发生注入锁定现象,导致 FP 激光器模式红移,即意味着 FP 激光器输出的波长为  $\lambda_p$  的信号是受到了波长  $\lambda_s$  的信号调制,从而得到了一个非反向的波长转换信号,随后在环形器的 3 端口,用一个掺铒光纤放大器和一个滤波器放大并滤出波长的信号,则得到了码型转换后的 RZ 信号。

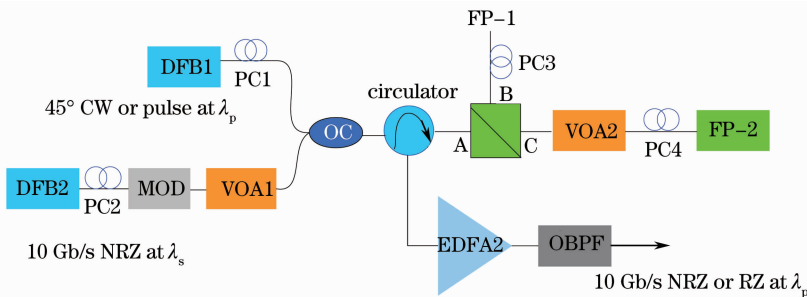


图 10 基于外部注入锁定激光器的 NRZ 到 RZ 码型转换原理图

Fig. 10 Format conversion principle from NRZ to RZ based on injection locked Fabry-Pérot laser

### 2.7 基于非线性环形镜的码型转换技术

非线性环形镜是一种重要的开关器件,基于非线性环形镜的码型变换技术,根据环中所使用的非线性介质不同,主要可以分为基于色散位移光纤、基于光子晶体光纤以及基于半导体光放大器三种,原理基本相似,这里主要阐述基于光子晶体光纤的码型转换技术。

基于光子晶体光纤的环形镜来实现码型转换,基本原理是根据在环形镜中顺时针逆时针传输的信号,所经历的相移不同,当它们再次相遇时,干涉并从另一端输出实现的。实验结构如图 11<sup>[36]</sup>所示:波长分别为  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$ ,  $\lambda_3$ ,  $\lambda_4$  的四路 NRZ 信号耦合后通过隔离器输入环形镜,隔离器的作用是阻止环形镜的反射。偏振控制器用来调节四路信号的偏振态,以确保其在进入环形镜时偏振态完全一致。控制信号与 NRZ 信号同步,由另



一个波长  $\lambda_c$  的增益开关激光器后接 500 m 色散补偿光纤联合产生,色散补偿光纤的作用是补偿增益开关激光器所产生的脉冲伴有的啁啾,以实现进一步压缩脉冲,此脉冲由置于环形镜环内的偏振分束器的一个端口引入环内,另一个端口进 NRZ 信号,即两者相互垂直,避免其间发生四波混频作用,但两者之间仍有交叉相位调制作用。两者组合后进入色散平坦 PCF,在其中发生交叉相位调制作用,顺时针和逆时针传输的 NRZ 信号在环形镜的  $2 \times 2$  端口相遇干涉,得 RZ 信号在另一端口输出。实际上,增益开关脉冲序列起到了一个闸控的作用。这种方案的优点是可同时实现多路信号的 NRZ 到 RZ 变换,但关键技术是要确保 NRZ 信号与控制信号垂直偏振,若两者同向偏振,则由于四波混频作用的干扰,得到 RZ 信号眼图 Q 因子较低。

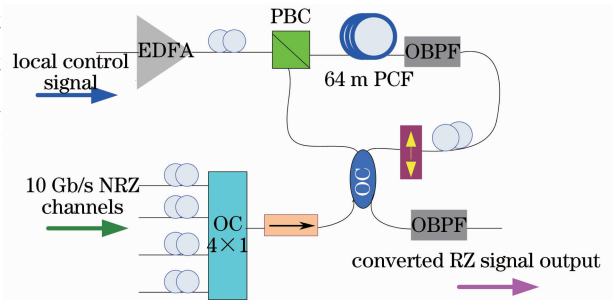


图 11 基于光子晶体光纤基 NOLM 的 NRZ 到 RZ 码型转换原理图

Fig. 11 Format conversion principle from NRZ to RZ in PCF-based NOLM

## 2.8 基于光纤延时线基马赫-曾德尔干涉仪的码型转换技术

马赫-曾德尔干涉仪是一种功能强大的开关器件,目前,利用马赫-曾德尔干涉仪,人们已经实现多个 DWDM 信道,具有信号再生功能的码型转换<sup>[37,38]</sup>。基本原理如图 12 所示,码型转换器的核心部件是一个掺铒光纤放大器、偏振控制器、相位调制器和温控光纤延时干涉仪,信道间距 100 GHz 的 16 个 NRZ 信号由 DWDM 光源经马赫-曾德尔器调制产生,后经一段单模光纤传输,以使 NRZ 信号恶化,从而进一步证明在后续码型转换的过程中是否能实现信号再生功能。信号经功率放大,偏振调节后注入相位调制器,相位调制器的作用是展宽信号光谱,光纤延时干涉仪起到一个梳状滤波器的作用,其频率间距设计为 100 GHz,因此能够同时提取所有信道在相位调制过程中,产生的频率啁啾对应的光谱部分,控制温度可以改变干涉仪两臂的相位差,使得延时干涉仪透射谱的峰值对应中心波长略微偏移信道中心波长,提取啁啾部分,抑制在先前传输过程中恶化的原始信号对应频率分量,因此,便同时实现了多信道的 NRZ 到 RZ 码型转换。此方法的优点是在码型转换的同时,具有信号再生功能,并且通过设计延时干涉的自由光谱范围等于信道间距时,便可使系统具备多信道转换的能力。

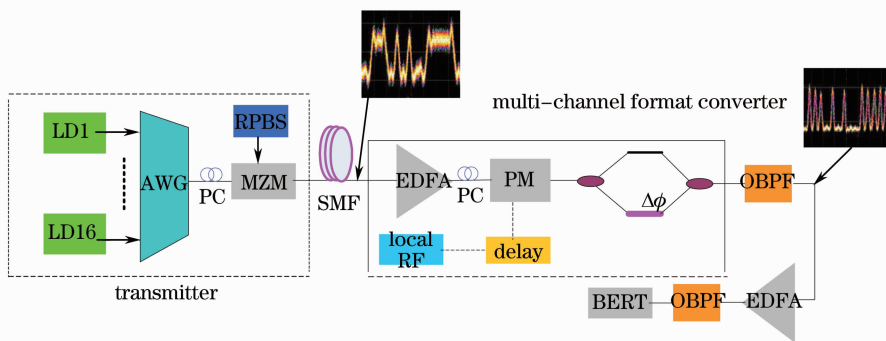


图 12 基于光纤马赫-曾德尔延时干涉仪的 NRZ 到 RZ 码型转换原理图

Fig. 12 Format conversion principle from NRZ to RZ in Mach-Zehnder delay interferometer

## 3 性能比较

衡量全光码型转换方案的优劣,测量系统误码率是最直接的方法,但在各种技术均无误码的情况下,还可进一步从以下参数来考察评价,如转换后的 RZ 误脉宽是否可调谐,系统是否偏振敏感,系统对于待转换的 NRZ 信号是否具有全光再生能力,系统是否具备多信道转换特性,码型转换的同时是否可完成波长转换功能等,得到比较结果如表 1。可见,不同的方案,性能差异较大,在实际使用中要综合考虑,合理利用。

表 1 各种 NRZ 到 RZ 码型转换技术的比较

Table 1 Comparison of various NRZ to RZ format conversion schemes

|                      | Pulse width tunability                  | Polarization sensitivity | Signal regeneration | Multiple-channel operation | Wavelength conversion capability |
|----------------------|---|--------------------------|---------------------|----------------------------|----------------------------------|
| Silicon based        |   |                          |                     |                            |                                  |
| Micro-ring resonator | no                                      | no                       | no                  | no                         | no                               |
| silicon nanometer    | no                                      | no                       | no                  | no                         | no                               |
| SPM in PCF           | no                                      | no                       | yes                 | no                         | no                               |
| XPM in PCF           | no                                      | yes                      | yes                 | no                         | yes                              |
| FWM in PCF           | yes                                     | yes                      | yes                 | yes                        | yes                              |
| In PPLN              | no                                      | yes                      | no                  | yes                        | yes                              |
| SOA+OBPF             | no                                      | Dependent on SOA         | no                  | no                         | no                               |
| XPOLM in SOA         | no                                      | yes                      | no                  | no                         | no                               |
| FWM in SOA           | yes                                     | yes                      | yes                 | yes                        | yes                              |
| SPM in DSF           | performance same as "SPM in PCF" scheme |                          |                     |                            |                                  |
| XPM in DSF           | performance same as "XPM in PCF" scheme |                          |                     |                            |                                  |
| XPOLM in DSF         | no                                      | yes                      | no                  | no                         | no                               |
| Injected-locked F-P  | no                                      | yes                      | no                  | no                         | no                               |
| PCF-based NOLM       | no                                      | yes                      | no                  | yes                        | no                               |
| SOA-based NOLM       | no                                      | yes                      | no                  | no                         | no                               |

## 4 存在问题

经过近十几年的发展,人们提出了各种全光 NRZ 到 RZ 码型转换方案,使得全光 OTDM/WDM 接口技术有了较大进步,但目前的全光 NRZ 到 RZ 码型转换方案,仍然存在一些问题,主要表现在以下方面:

1) 对大部分码型转换方案而言,其转换后的 RZ 码脉冲宽度不能随意调谐,因此脉宽不一定能满足后续处理的要求,这导致码型转换器在实际网络中使用有困难,因为从城域网中直接传输而来的 NRZ 码型,其脉宽一般都比较宽,很难将其转换为较窄的 RZ 码,以适用于时分复用后在主干网中传输,而且若转换后的 RZ 码消光比低或伴有较大的抖动,更需要在时分复用前进一步预处理。

2) 如果使用偏振不敏感半导体光放大器,则部分半导体光放大器基码型转换方案可以实现对偏振不敏感工作,如半导体光放大器级联滤波器的方案。但在几乎所有光纤基器件中,如色散位移光纤、光子晶体光纤、光纤延时干涉仪和光纤基非线性环形镜等的码型转换方案中,系统都是偏振敏感的,要想实现偏振不敏感工作,需要采用各种多样性消偏结构,而在光纤延时干涉仪中,往往还需要温控机制,这无疑增加了系统的复杂性。

3) 当采用硅纳米线或硅基微环谐振器做非线性介质实现码型转换时,虽然系统具有尺寸小、易于集成的优点,但由于器件工艺复杂,导致制作成本较高。而在硅光纤的方案中,由于硅光纤具有超快三阶非线性效应,所以器件一般具有对比特率透明的超高速工作特性,但为获得充分的非线性效应,往往需要相对较长的光纤或较大的输入功率。

4) 在基于半导体光放大器的转换方案中,由于材料中载流子恢复时间较长,往往会出现码型效应,特别是在高速率的情况下。

5) 许多方案中,虽然实现了码型转换,但转换的 RZ 码信号质量较低,如峰峰抖动大,幅值噪声较高等,影响后续光路对 RZ 信号的直接使用。

## 5 结束语

光子网络及其相关技术的飞速发展,给全光信号处理技术带来了生机,也提出了新的挑战,全光信号处

理技术的发展,又促进了超高速、大容量光子网络的进步与成熟,两者相辅相成,相得益彰。全光非归零到归零码型转换技术,是全光信号处理技术的典型代表,正在不断向广度和深度方面推进,特别是以硅纳米线、微环谐振器、光子晶体光纤和周期极化铌酸锂波导等为基础的新型光子器件的陆续面世,将为全光非归零到归零码型转换器的设计提供新的对策和思路。未来发展方向主要体现为两方面:一是性能优良的新型高非线性光子材料及其器件的开发,如高非线性硫化物波导、氧化物光纤甚至有机高非线性材料等;二是新型光子材料中一些非线性光学新现象,新原理的发现及其对应物理机制的揭示,以及这些现象在全光非归零到归零码型转换方面具备潜在应用的可行性的深入探究。相比目前实际网络中采用的基于电子器件的码型转换方案,全光码型转换是一个新兴课题,还存在许多新的发展空间。

### 参 考 文 献

- 1 Alan E. Willner, Omer Faruk Yilmaz, Jian Wang *et al.*. Optically efficient nonlinear signal processing[J]. *IEEE J. Sel. Topics Quant.*, 2011, **17**(2): 320~332
- 2 Hsu-Feng Chou. High-speed OTDM and WDM networks using traveling-wave electroabsorption modulators[J]. *IEEE J. Sel. Topics Quant.*, 2007, **13**(1): 58~69
- 3 Yu. Yu, X. Zhang, D. Huang. All-optical RZ-to-NRZ format conversion with a tunable fibre based delay interferometer [J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2006, **24**(3): 706~709
- 4 Yikai Su, Fangfei Liu, Qiang Li *et al.*. Signal processing in silicon waveguides[C]. IEEE, Communications and Photonics Conference and Exhibition (ACP), 2009. 1~2
- 5 Qianfan Xu, Michal Lipson. All-optical logic based on silicon micro-ring resonators[J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(3): 924~929
- 6 A. C. Tuner, M. A. Foster, A. L. Gaeta *et al.*. Ultra-low power parametric frequency conversion in a silicon microring resonator[J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(7): 488~4887
- 7 Yu Zhang, Enming Xu, Dexiu Huang. All-optical format conversion from RZ to NRZ utilizing microfiber resonator[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2009, **21**(17): 1202~1204
- 8 F. Xia, L. Sekaric, Y. Vlasov. Ultracompact optical buffers on a silicon chip[J]. *Nat. Photonics*, 2007, **1**(1): 65~71
- 9 Q. Xu, S. Manipatruni, B. Schmidt *et al.*. 12.5 Gbit/s carrier-injection-based silicon micro-ring silicon modulators[J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(2): 430~436
- 10 Linjie Zhou, Hui Chen. On-chip NRZ-to-PRZ format conversion using narrow-band Silicon microring resonator-based notch filters[J]. *IEEE J. Lightwave Technol.*, 2008, **26**(13): 1950~1955
- 11 W. Astar, Jeffrey B. Driscoll, Xiaoping Liu. 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.*, 2010, **16**(1): 234~249
- 12 Takashi Matsui, Kazuhide Nakajima, C. Fukai. Applicability of photonic crystal fiber with uniform air-hole structure to high-speed and wide-band transmission over conventional telecommunication bands[J]. *IEEE J. Lightwave Technol.*, 2009, **27**(23): 5410~5416
- 13 C. H. Kwok, S. H. Lee, K. K. Chow *et al.*. Photonic crystal fiber based all-optical modulation format conversions between NRZ and RZ with hybrid clock recovery from a PRZ signal[J]. *IET Optoelectron.*, 2007, **1**(1): 47~53
- 14 Gordon K. P. Lei, Chester Shu.  $4 \times 10$  Gb/s time and wavelength multicasting with NRZ to RZ format conversion using four-wave mixing in a highly nonlinear photonic crystal fiber[C]. OSA / OFC/NFOEC 2010. JWA49
- 15 J. A. Armstrong, N. Broembergen, J. Dcuing *et al.*. Interactions between light waves in a nonlinear dielectric[J]. *Phys. Rev.*, 1962, **127**(6): 1918~1939
- 16 J. E. McGeehan. All-optical digital 3-input AND gate using sum- and difference-frequency generation in a PPLN waveguide [J]. *Electron. Lett.*, 2007, **43**(7): 409~410
- 17 J. Wang, J. Q. Sun, Q. Z. Sun. Single-PPLN-based simultaneous half-adder, half-subtractor, and OR logic gate: proposal and simulation[J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(4): 1690~1699
- 18 H. Furukawa, A. Nirmalathas, N. Wada. Tunable all-optical wavelength conversion of 160 Gb/s RZ optical signals by cascaded SFG-DFG generation in PPLN waveguide[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2007, **19**(6): 384~386
- 19 S. L. Jansen, D. van den Borne, P. M. Krummrich *et al.*. Long-haul DWDM transmission systems employing optical phase conjugation[J]. *IEEE J. Sel. Topics Quant.*, 2006, **12**(4): 505~520

- 20 Jian Wang, Junqiang Sun, Xinliang Zhang *et al.*. Proposal for PPLN-based all-optical NRZ-to-CSRZ, RZ-to-CSRZ, NRZ-DPSK-to-CSRZ-DPSK, and RZ-DPSK-to-CSRZ-DPSK format conversions[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2008, **20**(12): 1039~1041
- 21 J. Wang, J. Q. Sun, Q. Z. Sun *et al.*. Experimental observation of all-optical non-return-to-zero-to-return-to-zero format conversion based on cascaded second-order nonlinearity assisted by active mode-locking[J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(16): 2462~2464
- 22 Y. Liu. Error-free 320 Gb/s all-optical wavelength conversion using a single semiconductor optical amplifier[J]. *IEEE J. Lightwave Technol.*, 2007, **25**(1): 103~108
- 23 X. Xie, J. Zhang, W. Zhao *et al.*. Analysis of polarization dependence for OTDM demultiplexers based on four-wavelength mixing in semiconductor optical amplifier[J]. *Opt. Commun.*, 2008, **281**: 958~964
- 24 Jianji Dong, Xinliang Zhang, Songnian Fu *et al.*. Ultrafast all-optical signal processing based on single semiconductor optical amplifier and optical filtering[J]. *IEEE J. Sel. Topics Quant.*, 2008, **14**(3): 770~778
- 25 Jianji Dong, Songnian Fu, Xinliang Zhang *et al.*. Single SOA based all-optical adder assisted by optical bandpass filter: Theoretical analysis and performance optimization[J]. *Opt. Commun.*, 2007, **270**(2): 238~246
- 26 B. Mikkelsen, M. Vaa, H. N. Poulsen *et al.*. 40 Gbit/s all-optical wavelength converter and RZ-to-NRZ format adapter realised by monolithic integrated active Michelson interferometer[J]. *Electron. Lett.*, 1997, **33**(2): 133~134
- 27 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]. *IEEE J. Lightwave Technol.*, 2010, **28**(1): 32~38
- 28 Jianji Dong, Xinliang Zhang, Jing Xu. 40 Gb/s all-optical NRZ to RZ format conversion using single SOA assisted by optical bandpass filter[J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(6): 2907~2914
- 29 X. Yang, A. K. Mishra, R. J. Manning. All-optical 40 Gbit/s NRZ to RZ format conversion by nonlinear polarization rotation in SOAs[J]. *Electron. Lett.*, 2007, **43**(8): 469~471
- 30 Andrea Reale. Format conversion of optical data using four-wave mixing in semiconductor optical amplifiers[J]. *IEEE J. Sel. Topics Quan.*, 2001, **7**(4): 703~709
- 31 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
- 32 C. H. Kwok, Chinlon 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. Topics Quan.*, 2006, **12**(3): 451~458
- 33 Bill Ping-Piu Kuo, P. C. Chui, Kenneth Kin-Yip Wong. All-optical tunable delay with NRZ-to-RZ format conversion capability based on optical kerr switch and pulse pre-chirping [J]. *IEEE J. Lightwave Technol.*, 2008, **26**(23): 3770~3775
- 34 C. Yu, L. -S. Yan, T. Luo. Width-tunable optical RZ pulse train generation based on four-wave mixing in highly nonlinear fiber[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2005, **17**(3): 636~638
- 35 C. W. Chow, C. S. Wong. All-optical data-format and wavelength conversion in two-wavelength injection locked slave Fabry-Perot laser diodes[J]. *Electron. Lett.*, 2003, **39**(13): 997~999
- 36 C. H. Kwok, Chinlon Lin. Simultaneous 4 10 Gb/s NRZ-to-RZ modulation format conversion in nonlinear optical loop mirror with a photonic crystal fiber[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2007, **19**(22): 1825~1827
- 37 Jianjun Yu, Gee Kung Chang. 40 Gbit/s signal format conversion from NRZ to RZ using a Mach-Zehnder delay interferometer[J]. *Opt. Commun.*, 2005, **248**(4-6): 419~422
- 38 Yu Yu, Xinliang Zhang, Jose B. Rosas-Fernández *et al.*. Simultaneous multiple DWDM channel NRZ-to-RZ regenerative format conversion at 10 and 20 Gb/s[J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(5): 3964~3969