

# 基于光子晶体光纤中四波混频效应的单到双非归零到归零码型转换\*

惠战强<sup>1)†</sup> 张建国<sup>2)</sup>

1)(西安邮电学院电子工程学院, 西安 710061)

2)(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, 西安 710119)

(2011年1月24日收到; 2011年3月24日收到修改稿)

归零(RZ)码与非归零(NRZ)码是波分复用和时分复用系统中广泛采用的两种码型, 全光NRZ到RZ码型转换能完成从波分复用到时分复用的网络接口功能, 是未来透明光子网络中一项重要的全光信号处理技术。提出并实验证实了一种基于色散平坦高非线性光子晶体光纤中四波混频效应的单到双NRZ到RZ码型转换方法, 将一束信号光与同步时钟脉冲同时输入色散平坦高非线性光子晶体光纤中, 通过四波混频过程, 产生两个携带该数据信息的闲频光, 从而实现了单到双的NRZ到RZ码型转换功能, 码型转换器工作波长在193 nm范围可调谐, 最大转换效率为-21 dB, 最优消光比和品质因子分别为11.9 dB和7.2。该方法的特点在于基于光纤中的四波混频效应工作, 因而具有对调制格式和比特率透明的优点, 同时, 光子晶体光纤特有的高非线性与色散平坦性, 既避免了使用传统光纤需要较长的长度, 又避免了波长设置不灵活的弊端, 并具备可进一步增加带宽的能力, 且在码型转换的同时, 实现了波长转换, 完成了双通道波长组播功能。整个系统为全光纤设计, 结构简单, 性能可靠, 并易于与现有的光纤通信系统兼容, 对促进超高速大容量光子网络的发展具有重要意义。

**关键词:** 码型转换, 四波混频, 光子晶体光纤

**PACS:** 42.81.Uv, 42.70.Qs, 42.65.-k

## 1 引言

随着视频点播、网络医疗等带宽增强型多媒体业务的不断出现, 人们对网络带宽的需求逐年增长, 构建超高速、大容量光子网络已成为人们的共识。波分复用(WDM)与时分复用(OTDM)是光纤通信系统中两种最主要的信号复用方式, 前者普遍采用非归零码(NRZ)格式, 因为其具有紧密的通道波长间距、较高的光谱效率、较强的时间抖动和色散容忍度, 主要用于城域网和接入网, 后者一般采用归零码(RZ)格式, 因为其具有小的占空比、较高的偏振模色散容忍度、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, 主要用于广域网。将WDM与OTDM技术相结合, 充分发挥两者的优势, 是未来光子网络的发展方向。在这样的系统中, 网络的不同部分将具有不同的信号调制格式, 因此, 能够有机地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>[1,2]</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, 它能够有效避免繁冗低效的光电转换, 突破传统电子学器件的工作速率极限, 在光域内将适用于城域网/接入网中传输的NRZ码转换为适于广域网中传输的RZ码, 从而完成从WDM到OTDM的转换, 实现网络接口功能<sup>[3,4]</sup>, 因此具有重要的实用价值。

目前, 实现全光NRZ到RZ的码型转换技术可以分为两种, 第一种是采用光电结合的方案, 主要依靠光电振荡器、相位调制器等高频电子器件, 具有设备昂贵且受电子器件“速率瓶颈”限制等弊端<sup>[5,6]</sup>, 第二种是采用全光的方式, 基于各种非线性光学效应来实现。进一步可分为基于半导体光放大器中交叉增益调制<sup>[7]</sup>, 交叉相位调制<sup>[8,9]</sup>, 交叉偏振调制<sup>[10]</sup>, 四波混频效应<sup>[11,12]</sup>; 基于色散位移高非线性光纤中交叉相位调制<sup>[13]</sup>, 交叉偏振调制<sup>[14]</sup>, 四波混频效应<sup>[15]</sup>, 基于周期极化铌酸锂波

\* 中国科学院知识创新工程重要方向性项目(批准号: KGCX2-YW-108) 和陕西省教育厅科研基金(批准号: 11JK0901)资助的课题。

† E-mail: zqhu@opt.ac.cn

导中级联和频/差频产生效应<sup>[16,17]</sup>, 基于硅纳米线中的交叉相位调制或四波混频效应<sup>[18]</sup>, 基于硅基微环谐振器的窄带滤波效应<sup>[19]</sup>等。其中, 四波混频效应具有对信号比特率和调制格式透明的优点, 因此备受关注。它进一步可分为两类, 第一类是采用单个信号光和抽运光, 同时提高其输入功率, 利用高阶四波混频效应连同光纤中的各种非线性效应, 产生多个新频率分量, 实现单到多的 NRZ 到 RZ 码型转换<sup>[20]</sup>, 另一种为利用多个信号光与抽运光相互作用, 仅基于一阶四波混频效应, 产生多个四波混频边带, 完成多 WDM 信道的 NRZ 到 RZ 码型转换<sup>[8]</sup>。但半导体光放大器中四波混频效应效率低下, 传统色散位移高非线性光纤又需要将抽运光与信号光设置在光纤零色散波长附近来满足相位匹配条件<sup>[21]</sup>, 限制了码型转换技术的灵活性。新出现的光子晶体光纤, 由在二维方向上紧密排列的纳米级微孔组成, 通过改变微孔的形状和尺寸, 可以灵活控制光纤的色散和非线性特性<sup>[22,23]</sup>, 完全避免了传统光纤的弊端, 非常适于用作全光信号处理器件<sup>[24,25]</sup>。同时, 由于是全光纤结构, 完全基于光纤中的三阶非线性极化机理工作, 具有结构简单, 响应速度快, 性能可靠, 宽带工作, 且易于与现有的商用化超高速光纤通信系统连接等优点, 非常具有发展前途。本文利用色散平坦高非线性光子晶体光纤中的四波混频效应, 首次实现了速率为 10 Gbit/s, 单到双的 NRZ 到 RZ 码型转换, 设计的码型转换器工作波长宽带可调谐, 且在码型转换的同时, 实现了波长转换和双通道波长组播功能, 理论仿真与实验结果相符合, 这些工作对于实现 WDM/OTDM 混合光子网络的发展具有一定指导作用。

## 2 理论分析

四波混频是多个光波在介质中相互作用导致的一种三阶非线性效应, 是在光子技术领域用来产生新频率光波分量的有效方法之一。一般而言, 当波长为  $\lambda_P$  的抽运光和  $\lambda_S$  的信号光以较强的功率入射进非线性光纤时, 在满足相位匹配的条件下, 便会发生四波混频作用, 导致在抽运光和信号光两侧对称位置产生两个新频率的闲频光波, 根据能量守恒定律, 两束闲频光波的波长可分别表示为

$$\lambda_{I1} = \frac{\lambda_P \lambda_S}{2\lambda_S - \lambda_P},$$

$$\lambda_{I2} = \frac{\lambda_P \lambda_S}{2\lambda_P - \lambda_S}$$

基于上述原理, 我们提出一种依据色散平坦高非线性光子晶体光纤中四波混频效应实现单到双码型转换的新方法, 具体原理如图 1 所示携带数据信息的信号光由波长为  $\lambda_S$  的连续光经调制产生, 为 NRZ 码数据流, 抽运光为波长为  $\lambda_P$  的窄脉冲宽度的光脉冲序列, 可看作占空比较小的比特全“1” RZ 码, 将两者耦合, 进一步功率放大后注入高线性光子晶体光纤。由于光子晶体光纤色散平坦, 在较宽波长范围内均可满足相位匹配条件, 发生明显四波混频效应, 导致在信号光和抽运光两侧产生两束闲频光。由于抽运光为比特全“1”光脉冲, 不携带任何信息, 而四波混频作用又相当于一个“与”门, 因此, 导致两个边带所含信息与信号光完全相同, 只是因为抽运光为占空比较小的窄脉冲, 使得闲频光对应的数据码型由原始信号光中的 NRZ 变为 RZ 码, 实现了单到双的码型转换。图 1(a), (b) 分别为发

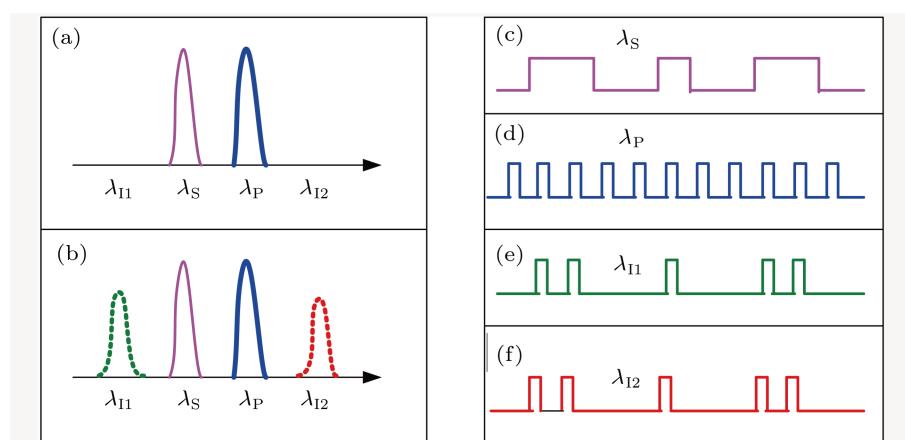


图 1 基于四波混频实现单到双 NRZ-RZ 码型转换原理图 (a) 输入光谱; (b) 输出光谱; (c)NRZ 信号时域波形; (d) 抽运光时域波形; (e) 闲频光 1(转换后的)RZ 波形; (f) 闲频光 2(转换后的)RZ 波形

生四波混频前后的光谱, 图 1(c), (d), (e) 和 (f) 分别为对应时域信号光、抽运光、闲频光 1 和闲频光 2 的波形。

我们不妨假设信号光频率为  $\omega_S$ , 抽运光频率为  $\omega_P$ , 闲频光频率分别为  $\omega_{I1}$  和  $\omega_{I2}$ , 在准连续波近似和慢变振幅近似下<sup>[26,27]</sup>, 上述四波混频过程可以用以下的耦合波方程描述:

$$\begin{aligned} \frac{\partial A_S}{\partial z} = & i\gamma_1 \left[ (|A_S|^2 + 2 \sum_{j \neq S} |A_j|^2) A_S \right. \\ & \left. + 2A_{I1}A_P A_S^* e_{SII1PS} + 2A_{I1}A_{I2}A_P^* e_{SI1I2P} \right. \\ & \left. + 2A_P^2 A_{I2}^* e_{SPPI2} \right] - \frac{\alpha_S}{2} A_S \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial A_P}{\partial z} = & i\gamma_2 \left[ (|A_P|^2 + 2 \sum_{j \neq P} |A_j|^2) A_P \right. \\ & \left. + 2A_S A_{I2} A_P^* e_{PSI2P} + 2A_{I1} A_{I2} A_S^* e_{PI1I2S} \right. \\ & \left. + 2A_S^2 A_{I1}^* e_{PSSI1} \right] - \frac{\alpha_P}{2} A_P, \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial A_{I1}}{\partial z} = & i\gamma_3 \left[ (|A_{I1}|^2 + 2 \sum_{j \neq I1} |A_j|^2) A_{I1} \right. \\ & \left. + 2A_S A_S A_P^* e_{I1-S-S-P} \right. \\ & \left. + 2A_S A_P A_{I2}^* e_{I1SPI2} \right] - \frac{\alpha_{I1}}{2} A_{I1}, \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial A_{I2}}{\partial z} = & i\gamma_4 \left[ (|A_{I2}|^2 + 2 \sum_{j \neq I2} |A_j|^2) A_{I2} \right. \\ & \left. + 2A_P A_P A_S^* e_{I2-P-P-S} \right. \\ & \left. + 2A_S A_P A_{I1}^* e_{I2SPI1} \right] - \frac{\alpha_{I2}}{2} A_{I2}, \end{aligned} \quad (4)$$

其中,  $A_j (j = S, P, I1, I2)$  分别代表信号光、抽运光、闲频光 1 和闲频光 2 的光场  $\gamma_j = n_2 \omega_j / c A_{\text{eff}}$  和  $\alpha_j$  为光纤的非线性系数和内部损耗, 等号右边第一项(即小括号里面部分)代表自相位和交叉相位调制项, 其他项为四波混频项, 其中  $e_{jklm} = \exp \{i[\beta(\omega_k) + \beta(\omega_l) - \beta(\omega_m) - \beta(\omega_j)]z\}$ ,  $j(k, l, m) = 1, 2, 3, 4$ , 描述与相位失配相关的量。上述耦合波方程描述了四束光波之间的相互作用, 例如, 频率为  $\omega_S$  的光波与以下各项均有关:  $2A_{I1}A_P A_S^* e_{SII1PS}$ ,  $2A_{I1}A_{I2}A_P^* e_{SI1I2P}$ ,  $2A_P^2 A_{I2}^* e_{SPPI2}$ , 而频率为  $\omega_P$  的光波与以下各项均有关:  $2A_S A_{I2} A_P^* e_{PSI2P}$ ,  $2A_{I1} A_{I2} A_S^* e_{PI1I2S}$ ,  $2A_S^2 A_{I1}^* e_{PSSI1}$ , 因此, 当信号光  $\omega_S$  上加载了 NRZ 码数据流以后, 信号光强随时间变化, 而抽运光为比特全“1”脉冲流, 因而导致产生的闲频光强度变化与信号光同步, 即信号光的信息加载到了闲频光上, 但由于抽运光为占空比很低的窄脉冲, 信号光却为占空比为 1 的宽脉冲, 两者在时域上重叠范围有限, 经过四波混频的“与”门作用, 导致闲频光脉冲宽度很窄, 即完成了 NRZ 到 RZ 的码型转换。

对于耦合波方程 (1)–(4), 可以通过数值迭代法求解, 计算中, 输入 NRZ 信号光是  $2^{23} - 1$ 、重复频率为 10 Gbit/s、脉冲宽度为 100 ps、功率为 22 dBm 的伪随机序列 (PRBS), 抽运光是与其同步的重复频率为 10 Gbit/s、脉冲宽度为 10 ps、功率为 20 dBm 的高斯脉冲序列, 信号光和抽运光中心波长分别为 1550 和 1547 nm; 光子晶体光纤参数为长度为 100 m, 非线性系数为  $11 \text{ W}^{-1} \text{ km}^{-1}$ , 在 1550 处色散为  $0.6 \text{ ps nm}^{-1} \text{ km}^{-1}$ , 在 1535 和 1580 nm 范围内色散斜率小于  $0.01 \text{ ps nm}^{-2} \text{ km}^{-1}$ , 损耗为 9 dB/km; 光电探测器的响应度为 1 A/W, 暗电流设为 1 nA, 忽略散弹噪声和热噪声。图 2 给出了 NRZ 到 RZ 码型转换中各光波的眼图。图 2(a), (b) 分别为输入 NRZ 信号光和抽运光的眼图, 图 2(c), (d) 分别为由四波混频产生的两个边带得到的转换后的 RZ 信号光眼图。从图 2 可以看出, 经码型转换得到的 RZ 信号光在比特“1”处出现归零, 说明实现了 NRZ 到 RZ 码型转换, 进一步比较图 2(c) 和 (d), 发现眼图张开度略有差别, 这是因为闲频光 1 和 2 的强度不同, 分别和与其邻近的光强平方呈正比, 即  $P_{I1} \propto \gamma^2 L^2 P_S^2(0) P_P(0)$ ,  $P_{I2} \propto \gamma^2 L^2 P_S(0) P_P^2(0)$ , 闲频光 1 在信号光旁侧, 因而在相同的参数下得到的眼图张开度更好。

### 3 实验装置与结果

基于色散平坦高非线性光子晶体光纤中四波混频效应实现全光 NRZ 到 RZ 码型转换的实验装置如图 3 所示波长可调谐连续光源 (Santec 公司生产, MLS—2100 型) 发出波长为 1556.22 nm 的连续光, 经偏振控制器后注入铌酸锂调制器, 偏振控制器的作用是保证入射光的振动方向与调制器主轴匹配, 以使调制效果最佳。信号源发出 10 GHz 射频 (RF) 信号驱动误码仪, 误码仪中的码型发生器提供字节长度为  $2^{31} - 1$ 、速率为 10 Gbit/s 的 PRBS, 然后驱动铌酸锂外调制器, 产生一个重复频率为 10 Gbit/s 的 NRZ 光信号。抽运光由主动锁模半导体激光器发出的重复频率为 10 GHz 的超短脉冲序列充当, 脉冲宽度为 1.9 ps, 中心波长为 1550 nm, 经过偏振控制器后。信号光与抽运光耦合注入高功率掺铒光纤放大器 (HP-EDFA, Keopsys 公司生产, 工作波长范围为 1535—1565 nm, 饱和输出功率为 34 dBm, 噪声指数小于 6 dB) 放大, 然后进入 100 m 光子晶体光纤, 由于信号光与抽运光功率较高, 在光子晶体光纤中发生四波混频效应, 在其两侧产生两个边带, 完成码型转换功能。实验中, 我们用横河 AQ6370 型光谱仪 (分辨率 0.02 nm)

来测量光谱, 使用 70 GHz 带宽光电探测器 (U<sup>2</sup>T 型号为 XPDV 3120 R) 完成光电转换功能, 并配以 Ag-

ilent 公司生产的 70 GHz 带宽 86100 C 型高速采样示波器来测量波形和眼图.

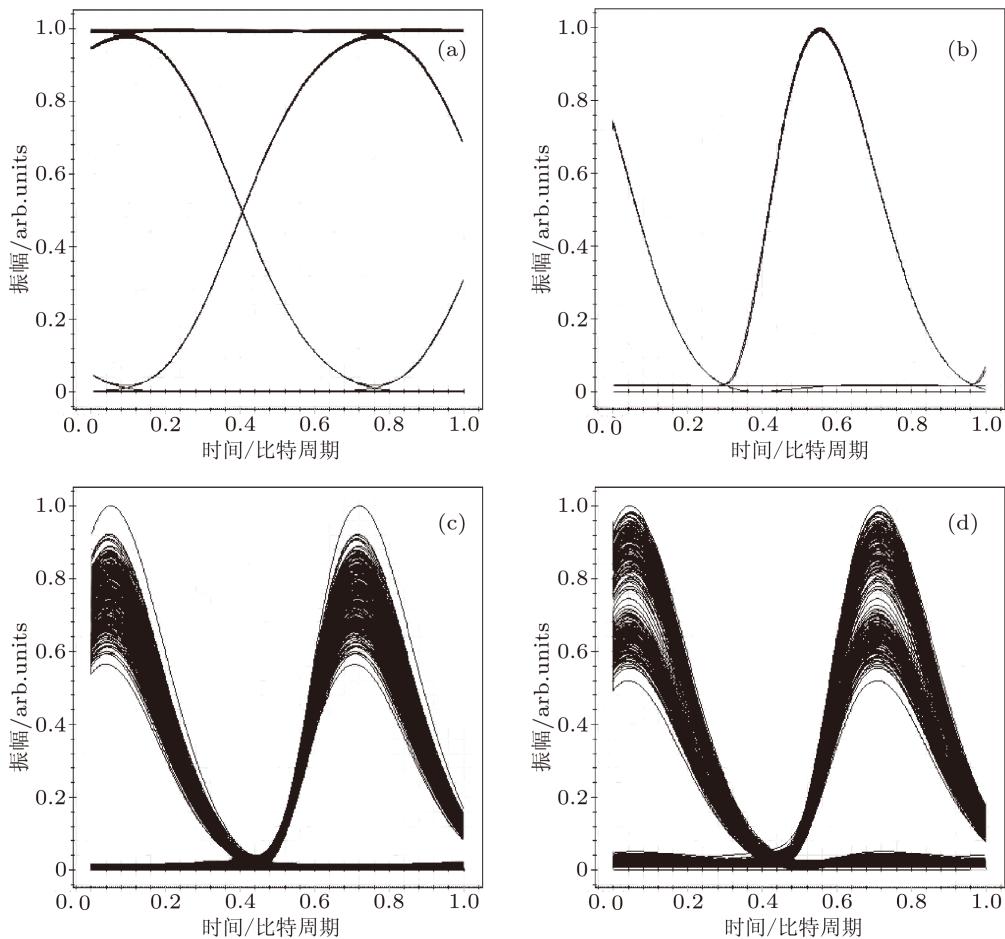


图 2 基于光子晶体光纤中四波混频效应的全光 NRZ 到 RZ 码型转换数值模拟结果 (a) 原始 NRZ 信号眼图,  $\lambda_S = 1556.22 \text{ nm}$ ; (b) 抽运脉冲眼图,  $\lambda_P = 1550 \text{ nm}$ ; (c) 转换 RZ 信号眼图,  $\lambda_{I1} = 1543.78 \text{ nm}$ ; (d) 转换 RZ 信号眼图,  $\lambda_{I2} = 1542.66 \text{ nm}$

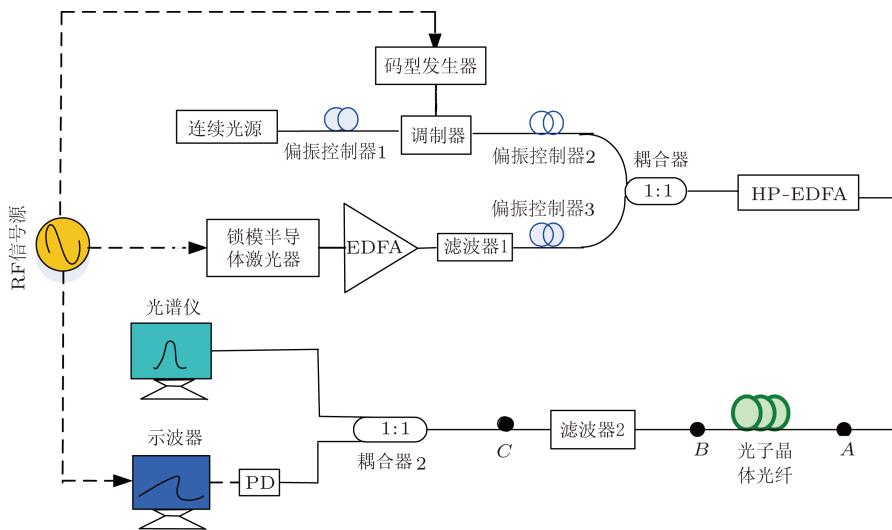


图 3 基于高非线性光子晶体光纤中四波混频效应实现码型转换的实验装置示意图

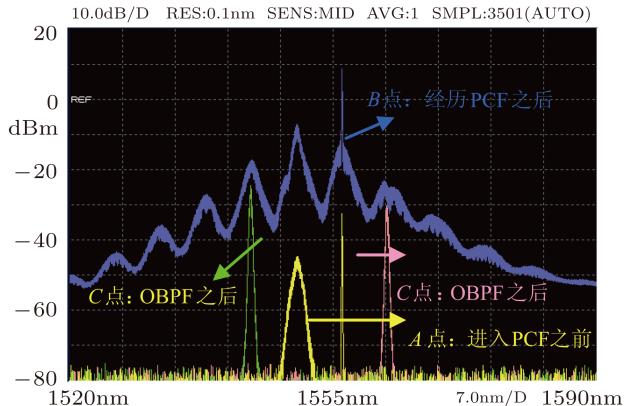


图 4 基于高非线性光子晶体光纤中四波混频效应实现码型转换的光谱

实验中用光谱仪实时监测光谱变化,以判断是否有四波混频现象发生,同时不断调节入射光偏振

态,进而使四波混频效果最佳。当用 HP-EDFA 将总功率放大至 26.5 dBm 后,测得光谱如图 4。图 4 分别给出了进入光子晶体光纤之前、在光子晶体光纤内发生四波混频效应后以及经过光学带通滤波器输出的光谱(相当于图 3 中的 A, B 和 C 点),实验中为了保护光光谱仪并便于比较光谱,在信号进入光谱仪之前均进行了不等幅的功率衰减。由光子晶体光纤输入输出端测得的光谱可知,在进入光子晶体光纤之前只有信号光和抽运光,而经过光纤后,输出端光谱成分变得丰富。从图 4 可以看出以下两个特点:首先,信号光对应光谱发生了展宽,这是由于交叉相位调制现象所致。其次,信号光和控制光在光纤内发生了明显的四波混频效应,在两侧有闲频波分量产生。由于光子晶体光纤非线性系数较高,加之入射功率较大,在光纤内产生的非线性效应相当强烈,甚至伴有高阶四波混频分量出现。

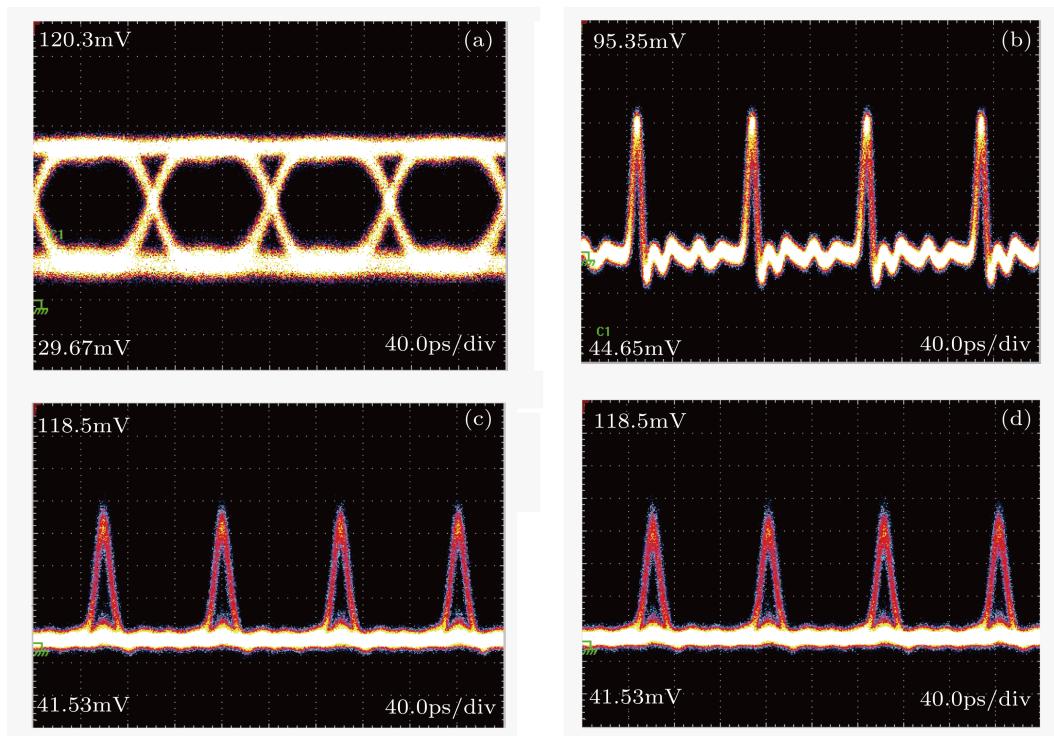


图 5 基于高非线性光子晶体光纤实现码型转换不同信号的眼图 (a) 原始 NRZ 信号 ( $\lambda = 1556.22 \text{ nm}$ ) 的眼图; (b) 抽运时钟信号 ( $\lambda = 1550 \text{ nm}$ ) 的眼图; (c) 码型转换后左侧闲频光 ( $\lambda = 1543.78 \text{ nm}$ ) 对应的 RZ 眼图; (d) 右侧闲频光 ( $\lambda = 1562.44 \text{ nm}$ ) 对应的 RZ 眼图。

为了证明我们的装置实现了码型转换功能,需要使用示波器测量闲频光的时域特性。实验中使用滤波器(对应图 3 实验装置中的滤波器 2)将两侧的一阶边带分量依次滤出,此滤波器由 Santec 公司提供,中心波长在 1530—1570 nm 连续可调,3 dB 带宽为 0.36 nm,输出信噪比大于 40 dB,将滤出的

信号进一步放大后经过光电转换,用示波器测量了各闲频光的时域特性,图 5 为用示波器监测眼图得到结果。图 5(a)为原始待变换的 NRZ 信号眼图,图 5(b)为与 NRZ 信号同步的抽运光脉冲时钟信号眼图,图 5(c)和图 5(d)分别为将左边闲频光波分量(波长在 1543.78 nm)和右边左边闲频光波分

量(波长在 1562.44 nm)滤出, 得到转换后的 RZ 信号眼图。从图 5 可以看出, 转换后得到的 RZ 信号光比特“1”出现归零, 并且具有较小的幅值噪声和峰峰抖动, 说明实现了单到双的 NRZ 到 RZ 码型转换。进一步观察发现, 同样抽运功率下左侧闲频光对应的 RZ 信号眼图略优于右侧 RZ 信号。分析认为, 这是由于左侧闲频光功率与抽运光功率平方以及信号光功率成正比, 而右侧闲频光功率正好相反, 即与信号光功率平方和抽运光功率成正比, 这与模拟结果一致。最后需要指出, 由于闲频光与信号光波长不同, 说明该装置在码型转换的同时实现了波长转换功能。

## 4 分析与讨论

对于码型转换器而言, 只有保证转换后的码型

具有较高的性能, 才能满足未来透明光子网络的需求。因此, 分别从工作波长范围(波长调谐性)、转换效率和对输入功率波动的容忍性几个方面来衡量码型转换器性能, 其中对输入功率波动容忍性体现在转换信号质量上。由于缺乏高质量的误码测试系统, 我们从品质因子 Q 和消光比(ER)两方面对转换信号的质量进行表征和测试。Q 能够反映信号的噪声特性, 其定义为<sup>[28]</sup>

$$Q = \frac{\mu_1 - \mu_0}{\sigma_1 - \sigma_0}, \quad (5)$$

其中,  $\mu_1$  和  $\mu_0$  分别是信号为“1”和“0”时脉冲幅度的平均电平值,  $\sigma_1$  和  $\sigma_0$  为“1”和“0”信号的高斯噪声标准偏差。Q 与误码率紧密相关, 能够准确表征组播信号的整体性能。而 ER 定义为输出逻辑“1”的平均功率与输出逻辑“0”的平均功率之比, 表示为  $10\lg[P(1)/P(0)]$ 。

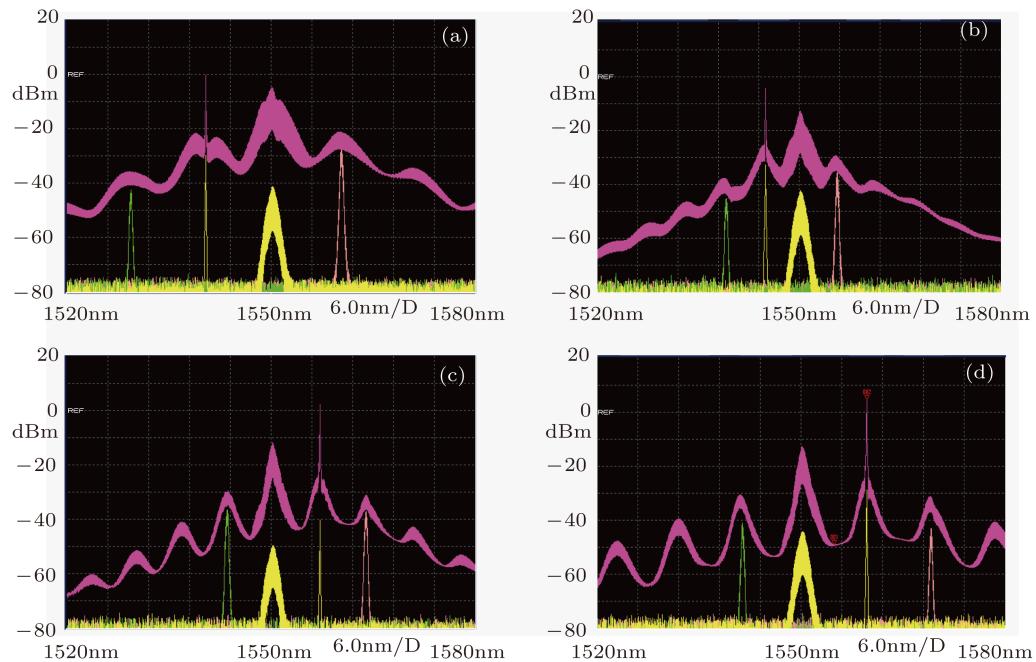


图 6 基于光子晶体光纤中四波混频效应对不同波长 NRZ 信号实现码型转换的光谱特征 (a)  $\lambda_s = 1540.42$  nm; (b)  $\lambda_s = 1545.03$  nm; (c)  $\lambda_s = 1557.23$  nm; (d)  $\lambda_s = 1559.71$  nm

### 4.1 波长调谐性

为了充分利用光纤的巨大带宽, 进一步优化资源配置, 在未来的透明光子网络中, 所设计的码型转换器需具有较宽的工作波长范围。但在传统的基于色散位移光纤中四波混频效应的码型转换器中, 相位匹配条件要求抽运光必须设置在光纤零色散波长附近。这限制了码型转换器的工作波长灵活性, 不能满足未来 WDM 网络的需求。在我们

的码型转换方案中, 采用新型具有色散平坦性的高非线性光子晶体光纤。由于光纤的色散平坦性, 在较宽波长范围内均有明显的四波混频效应发生。基于此, 实验分别选取信号光中心波长为 1540.42, 1545.03, 1557.23 和 1559.71 nm, 观察在不同抽运光与信号光波长间距下该码型转换器的性能, 得到的光谱如图 6 所示。光谱中下面部分为进入光子晶体光纤之前的光谱, 上面部分为在光子晶体光纤中发生四波混频效应后的输出光谱, 两个边带为用窄带

滤波器滤出的闲频光分量(分别对应图3中的A, B和C点). 结果表明, 在进入光子晶体光纤之前只有信号光和抽运光, 而经过光子晶体光纤传输后, 在输出端信号光和抽运光两侧均出现边带. 说明在光子晶体光纤中均发生了明显的四波混频效应. 进一步将各边带(即四波混频产生的闲频光波)滤出, 经功率放大、光电转换后用示波器进行时域测量, 眼图监测显示均得到了与原始NRZ信号相对应的RZ码. 结果表明, 我们的码型转换器实现了对不同波长NRZ信号的码型转换, 且在码型转换的同时实现了波长转换, 并完成了信号的单到双通道组播功能. 实际上, 由于我们采用的铌酸锂调制器和HP-EDFA工作波长范围有限, 导致设计的码型转换器工作波长范围受限, 并且输出光谱表现出不平坦特性. 若实验中采用具有较宽工作波长范围的高功率放大器和调制器, 则我们设计的码型转换器工作波长范围还可进一步拓展.

## 4.2 转换效率

转换效率是衡量码型转换器性能的另一个重要参数. 采用半导体光放大器中四波混频效应实现的码型转换器, 其主要缺点就是转换效率低下, 这在一定程度上限制了它在光子网络中的应用. 而基于光子晶体光纤的码型转换器, 由于光纤较高的非线性系数和色散平坦特性, 因而有望得到较高的转换效率. 转换效率定义为<sup>[29]</sup>

$$\eta = 10 \cdot \lg \frac{P_c}{P_s}, \quad (6)$$

其中,  $P_c$  和  $P_s$  分别为转换信号功率和原始输入信号功率.

$$P_c = \frac{1024\pi^6}{n^4\lambda^2c^2} \cdot \left(\frac{3\chi_{1111}}{A_{\text{eff}}}\right)^2 \cdot L_{\text{eff}} \cdot P_p^2 P_s \cdot \exp(-\alpha L) \cdot \zeta, \quad (7)$$

其中,  $(1024\pi^6/n^4\lambda^2c^2) \cdot (3\chi_{1111}/A_{\text{eff}})^2 = \gamma$  是非线性系数,  $L_{\text{eff}} = (1 - e^{-\alpha L})/\alpha$  代表有效相互作用长度,  $\zeta = (\alpha^2/\alpha^2 + \Delta\beta^2)\{1 + (4e^{-\alpha L}/(1 - e^{-\alpha L})) \sin^2[\Delta\beta(L/2)]\}$  是转换效率系数,  $\Delta\beta = \beta_c + \beta_s - 2\beta_p$  是传输常数的差值, 将(7)式代入(6)式, 可得转换效率, 但对于我们的码型转换器, 信号光同时转换到了两个闲频光上, 进而实现了组播功能, 因此, 需对每路信号分别分析各自的转换效率. 实验中固定抽运光波长  $\lambda_p = 1550 \text{ nm}$ , 调谐信号光波长从 1540—1559 nm, 间隔 3 nm 测量一次, 得到在不同波长上的转换效率如图7, 由图7可知, 在测量波长范围内, 转换效率随波长移动变化不明显, 这主要是由于光子晶体光纤的色散平坦性决定的, 同时, 在不同波长上转换效率略有差异, 这主要是由光纤色散特性非理想平坦决定的. 由于转换效

率与转换信号质量存在着一定关系, 我们进一步测量了在不同信号波长时得到的最佳品质因子  $Q$  与 ER, 结果如图8所示. 由图8可知, 当信号光与抽运光波长间距较小时, 得到的转换信号质量较好, 随着二者波长间距增大, 在其他参数不变的条件下得到的转换信号质量有所下降. 经分析认为, 这是由于四波混频效率逐渐降低引起的.

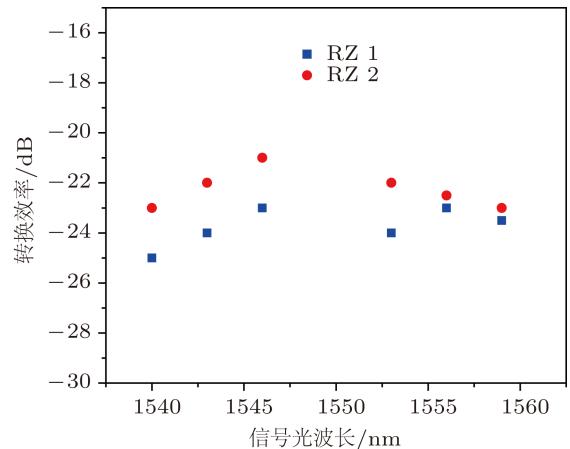


图7 当NRZ信号光波长不同时得到的转换效率

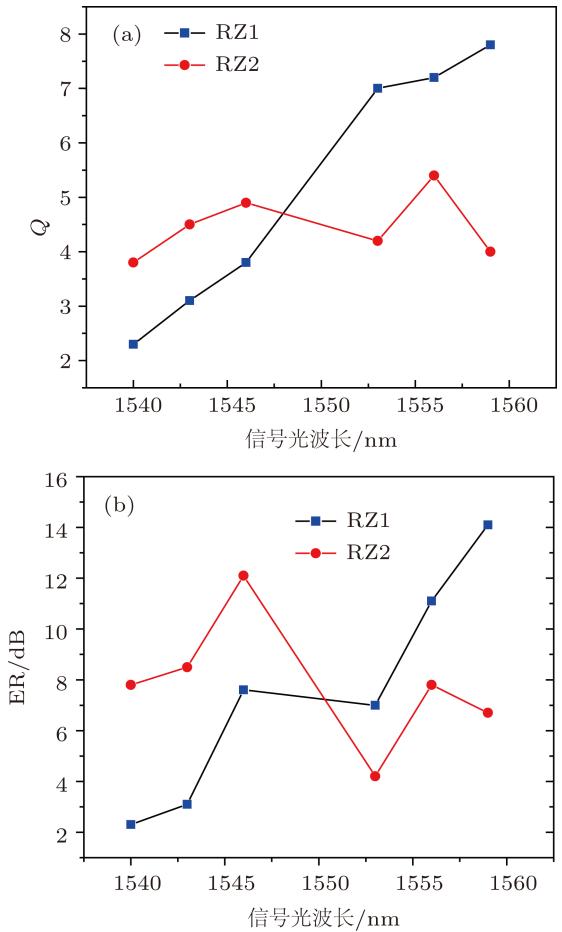
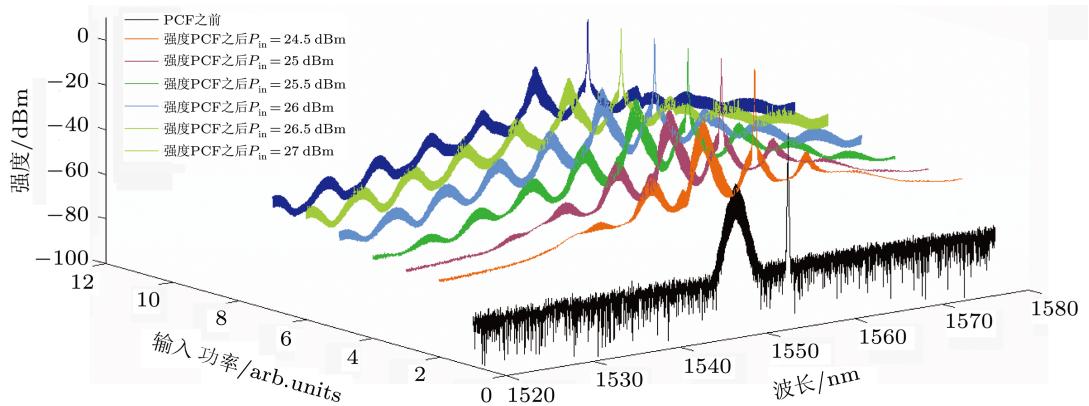


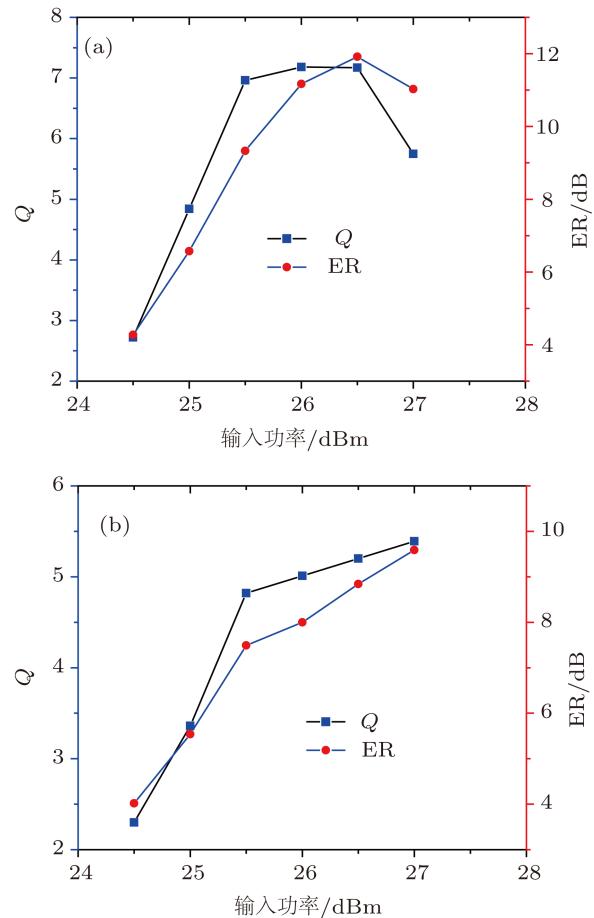
图8 当NRZ信号光波长不同时得到的转换RZ信号质量 (a); (b) ER (其中, 转换光RZ1对应 $\lambda_{I1} = 1543.78 \text{ nm}$ , 转换光RZ2对应 $\lambda_{I2} = 1562.44 \text{ nm}$ )

图 9 不同输入功率下 NRZ 到 RZ 码型转换器的光谱  $\lambda_s = 1556.22 \text{ nm}$ ,  $\lambda_p = 1550 \text{ nm}$ 

### 4.3 对输入功率波动的容忍性

在实际的光子网络中,由于网络环境的改变,信号功率总是随机起伏的,具有一定的功率波动性;同时,较大的输入功率还可能导致其他非线性效应的产生。这将会恶化光网络的性能。因此,测量码型转换器对输入信号功率波动的容忍性不仅具有重要的物理意义,而且还具有潜在的工程应用价值。实验中,我们不断调节 HP-EDFA 的抽运电流,分别测量了输入功率为 24.5—27 dBm、间隔为 0.5 dBm 时光纤中四波混频效应的强弱以及转换得到的 RZ 信号的  $Q$  和 ER。光谱如图 9 所示,信号质量与输入功率的依赖关系如图 10 所示。结果表明,在光谱方面,当输入功率为 24.5 dBm 时,只有一阶四波混频效应较为明显,随着输入功率的进一步增大,光子晶体内的非线性效应显著增强,不仅出现高阶四波混频效应,而且表现出自相位调制导致的光谱展宽现象,进而表现为光谱基座出现部分重叠。在时域方面,对于闲频光 1( $\lambda_{I1} = 1543.78 \text{ nm}$ ) 对应的转换得到的 RZ 信号而言,其  $Q$  值和 ER 先迅速增大,稳定一个范围后缓慢减少,而对于闲频光 2( $\lambda_{I2} = 1562.44 \text{ nm}$ ) 对应的 RZ 信号,其  $Q$  值和 ER 在测量的功率范围内先迅速增大,后增大趋势变得平稳。分析认为,转换信号品质因子  $Q$  和 ER 初始的增长是由于不断增大的输入功率导致四波混频转换效率不断增大所致。功率进一步增大后,在其中一个通道上(闲频光 1 对应的 RZ),品质因子  $Q$  和 ER 出现减小是由于较强的非线性效应导致光谱重叠,进而导致信道串扰最终致使信号畸变。但从对两个闲频光对应 RZ 信号测量结果上均可以看出,在大于 2 dB 的功率波动范围内,信号质量均比较好,说明我们设计的码型转换器具有良好的功率

波动容忍性。

图 10 输入功率波动对码型转换信号质量的影响 (a) RZ1,  $\lambda_{I1} = 1543.78 \text{ nm}$ ; (b) RZ2,  $\lambda_{I2} = 1562.44 \text{ nm}$ 

### 5 结 论

基于色散平坦高非线性光子晶体光纤中的四波混频效应,提出并实现了单到双 NRZ 到 RZ 码型转换。首先基于耦合波方程进行数值仿真,证实了

设计方案的可行性,进而从实验上验证了系统功能。结果表明,设计的码型转换器可在 19.3 nm 波长范围内实现宽带调谐,最大转换效率可达 -21 dB,最优 ER 和  $Q$  值分别为 11.9 dB 和 7.2,整个系统基于光纤中的三阶非线性效应工作,具有噪声低、对调

制格式和比特率完全透明等优点,系统在码型转换的同时,还实现了波长转换,且具有单到双的波长组播功能。理论仿真与实验结果一致。这些结果对于构建未来的 WDM/OTDM 网络接口技术具有重要的参考意义。

- [1] Willner A E, Yilmaz O F, Wang J, Wu X X 2010 *IEEE J. Select. Top. Quantum Electron.* **16** 320
- [2] Hayashi M, Tanaka H, Ohara K, Otani T 2002 *IEEE J. Lightwave Technol.* **20** 236
- [3] Norte D, Willner A E 1995 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **7** 1354
- [4] Chou H F, Bowers J E 2007 *IEEE J. Select. Top. Quantum Electron.* **13** 58
- [5] Huo L, Dong Y, Lou C Y 2002 *Acta Electron. Sin.* **30** 1305
- [6] Lasri J, Devgan P, Grigoryan V S, Kumar P 2004 *Conference on Lasers and Electro-Optics* 17–21 May, 2004, San Francisco, U.S.A. pp16—21
- [7] Lin G, Yu K, Chang 2006 *Opt. Lett.* **31** 1376
- [8] Noel L, Shan X, Ellis A D 1995 *IEEE Electron. Lett.* **31** 277
- [9] Dong J, Zhang X L, Xu J 2007 *Opt. Express* **15** 2907
- [10] Yang X, Mishra A K, Manning R J 2007 *IEEE Electron. Lett.* **43** 469
- [11] Reale A, Lugli P, Betti S 2001 *IEEE J. Select. Top. Quantum Electron.* **7** 703
- [12] Dong J, Zhang X, Wang F, Yu Y, Huang D 2008 *IEEE Electron. Lett.* **44** 763
- [13] Kwok C H, Lin C L 2006 *IEEE J. Select. Top. Quantum Electron.* **12** 451
- [14] Kuo B P P, Chui P C 2008 *IEEE J. Lightwave Technol.* **26** 3770
- [15] Yu C, Yan L S, Luo L, Wang Y 2005 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **17** 636
- [16] Wang J, Sun J Q, Sun Q Z 2007 *Opt. Lett.* **32** 2462
- [17] Wang D L, Sun J Q, Wang J 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 252 (in Chinese) [汪大林, 孙军强, 王健 2008 物理学报 **57** 252]
- [18] Astar W, Driscoll J B, Liu X P, Dadap J I 2010 *IEEE J. Select. Top. Quantum Electron.* **16** 234
- [19] Zhou L J, Chen H 2008 *IEEE J. Lightwave Technol.* **26** 1950
- [20] Yan L S, Yi A L, Pan W, Luo B, Ye J 2010 *Opt. Express* **18** 21404
- [21] Wang Y, Yu C, Luo T, Yan L, Pan Z 2005 *J. Lightwave Technol.* **23** 3331
- [22] Petropoulos P, Monro T M, Belardi W 2001 *Opt. Lett.* **26** 1233
- [23] Russell P 2003 *Science* **299** 358
- [24] Zsigri B, Peucheret C 2006 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **18** 2290
- [25] Fok M P, Shu C 2007 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **19** 1166
- [26] Liu X M 2008 *Phys. Rev. A* **77** 043818
- [27] Liu X M, Zhou X Q, Lu C 2005 *Phys. Rev. A* **72** 013811
- [28] Zhang J Y, Wu J, Feng C F 2007 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **19** 33
- [29] Bogris A, Syvridis D 2003 *IEEE J. Lightwave Technol.* **21** 1892

# All-optical format conversion from non-return-to-zero to return-to-zero based on four-wave mixing in photonic crystal fiber\*

Hui Zhan-Qiang<sup>1)†</sup> Zhang Jian-Guo<sup>2)</sup>

1) (Xi'an Institute of Posts and Telecommunications, Xi'an 710061, China)

2) (State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China)

(Received 24 January 2011; revised manuscript received 24 March 2011)

## Abstract

The conversion from all-optical non-return-to-zero (NRZ) to return-to-zero (RZ) format is a crucial technology in interfacing WDM and OTDM of future transparent photonic network. The conversion from all-optical single-to-dual NRZ to RZ format conversion is presented and experimentally demonstrated based on four-wave mixing (FWM) in a 50 m dispersion-flattened highly-nonlinear photon crystal fiber (DF-HNL-PCF). The original NRZ format is converted into RZ format by injecting synchronized clock signal into the DF-HNL-PCF. The FWM effect generates two sideband components, which carry the same data information as the original NRZ signal with RZ format. The proposed format converter has a wide and tunable operation wavelength range of 19.3 nm. The optimum conversion efficiency, extinct ratio and  $Q$  factor are  $-21$  dB,  $11.9$  dB and  $7.2$ , respectively. The system is transparent to both bit rate and modulation format. The advantage of this scheme consists in the ability of bandwidth scalable due to the fact that the dispersion flattening of HNL - PCF is used. Furthermore, it is all optical fiber, compact and robust, which makes it more competitive as well as easily accessible for use in practical optical communication systems.

**Keywords:** all-optical format conversion, four-wave mixing (MP-FWM), photonic crystal fiber (PCF)

**PACS:** 42.81.Uv, 42.70.Qs, 42.65.-k

\* Project supported by the Main Direction Program of Knowledge Innovation of Chinese Academy of Sciences (Grant No. KGCX2 - YW - 108), and the Scientific Research Foundation of Shaanxi Education Bureau of Shaanxi Province (Grant No. 11JK0901).

† E-mail: zqhui@opt.ac.cn