

基于光子晶体光纤中双抽运四波混频效应的非归零到归零码型转换实验研究*

惠战强^{1)†} 张建国²⁾

1) (西安邮电大学电子工程学院, 西安 710121)

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)

(2012年6月1日收到; 2012年12月21日收到修改稿)

提出并实验证实了利用色散平坦高非线性光子晶体光纤中双抽运四波混频效应实现非归零 (NRZ) 到归零 (RZ) 码型转换的新方案, 将一束 NRZ 信号光与两束同步时钟脉冲光同时注入光子晶体光纤, 通过双抽运四波混频效应产生两个闲频光, 经过光学滤波后即可完成单到双全光 NRZ-RZ 码型转换. 与基于常规单抽运四波混频效应的码型转换方式相比, 本设计方案由于采用了双抽运四波混频效应, 因此具有双路组播信号波长可彼此独立选取的优点. 分析了码型转换器的波长调谐性及对输入光功率波动的容忍性, 得到转换信号的最优消光比和 Q 因子分别为 15 dB 和 5.4. 研究表明, 本方案既具有对比特率和调制格式透明的优点, 又避免了使用单抽运四波混频效应进行码型转换时两路组播信号波长相互制约的弊端, 且实现了全光波长转换和波长组播功能.

关键词: 码型转换, 四波混频, 双抽运, 光子晶体光纤

PACS: 42.65.-k, 42.79.Sz, 42.79.Nv, 42.70.Qs

DOI: 10.7498/aps.62.084209

1 引言

高清电视、互联网业务日益融合, 不断刺激着网络带宽持续增长, 将各种新型调制格式与复用方式相结合, 构建超高速、大容量光子网络, 是当前光纤通信的发展趋势. 在实际应用中, 非归零码 (NRZ) 具有较高的光谱效率和时间抖动容忍性, 主要用于波分复用 (WDM) 系统中; 而归零码 (RZ) 的占空比相对较小, 具有良好的抗链路非线性损伤能力, 主要用于光时分复用 (OTDM) 系统中. 未来的超高速光纤通信网络将采用 WDM 与 OTDM 相结合的方式, 以充分发挥两种技术的优势. 在这样的混合系统中, 网络的不同部分具有不同的调制格式. 因此, 如何将光子网络中的不同部分有机结合以实现全光网络接口和确保不同调制格式网络间的无缝连接, 已成为实现全光通信网的研究热点^[1-4]. 全光 NRZ-RZ 的码型转换技术是实现全光网络接

口的关键技术之一, 它能在光域内将 NRZ 码转换为 RZ 码, 完成从 WDM 到 OTDM 的转换, 从而增加网络的级联性和扩展性^[4,5], 对透明光子网络的设计与实现具有重要的价值.

一般来讲, 光学 NRZ 到 RZ 的码型转换技术可以通过光电结合和全光结构两种方案加以实现. 前者主要依靠相位调制器^[6,7]、光电振荡器^[8]、Fabry-Perot 激光器^[9] 等光电器件及相关高频电子器件, 虽然工作原理简单, 但具有设备昂贵且受电子“速率瓶颈”限制等弊端. 后者主要是基于各种光子器件中的非线性光学效应来实现, 例如, 可利用交叉相位调制效应、交叉偏振调制效应、四波混频效应、主要存在于半导体光放大器中的交叉增益调制效应^[10]、基于电吸收调制器的交叉吸收调制效应^[11]、主要存在于周期极化铌酸锂波导中的二阶和频/差频产生效应^[12-14]、基于硅基微环谐振器的窄带滤波效应^[15,16]、含有耦合环形硅波导共振器的非平衡干涉效应^[17]、光克尔开关联合

* 中国科学院、国家外国专家局创新团队国际合作伙伴计划和国家自然科学基金 (批准号: 61201193) 资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: zhanqianghui@xupt.edu.cn

脉冲预啁啾效应^[18]和基于太赫兹光学非对称解复用器结构中的瞬时相位调制效应^[19]等. 其中, 交叉相位调制效应可以在半导体光放大器^[20,21]、高非线性光纤^[3]、硅纳米线^[22]、光子晶体光纤^[23]等器件中产生; 而交叉偏振调制效应可借助于半导体光放大器^[24]和高非线性光纤^[25]等加以实现. 在上述这些效应中, 由于四波混频效应是一个满足能量动量守恒的超快非线性过程, 因此基于此原理的码型转换器具有对信号调制格式和比特率完全透明的优点, 非常适合于在未来透明光子网络中的应用. 目前, 四波混频效应的产生主要是通过使用半导体光放大器^[26]、色散位移高非线性光纤^[27,28]、硅纳米线^[22]、光子晶体光纤^[29]、三五族化合物波导^[30]等光子器件. 基于四波混频效应的全光 NRZ 到 RZ 码型转换方案可以分为两类, 第一类是采用单个信号光和单个抽运光, 同时提高其输入功率, 利用级联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^[28]; 另一种为利用多个信号光与单个抽运光相互作用, 仅基于一阶四波混频效应, 产生多个四波混频边带, 完成单到多的 NRZ 到 RZ 码型转换^[20]. 可是, 传统色散位移光纤需要将信号光与抽运光设置在光纤零色散点附近, 因此限制了该技术的灵活性. 而半导体光放大器又存在着四波混频效率低的问题. 新出现的光子晶体光纤具有可控的非线性和色散特性^[31,32], 因此非常适于用作全光信号处理器^[33,34]. 我们曾利用色散平坦光子晶体光纤中的单抽运四波混频效应实现了速率为 10 Gbit/s 的 NRZ 到 RZ 码型转换^[29]. 但是在此结构中, 由于受到四波混频能量守恒原理限制, 两

路组播信号的波长相互制约, 不能独立调谐, 在一定程度上限制了光网络的灵活性. 为了解决这一问题, 本文提出采用双抽运结构的双波混频效应实现单到双 NRZ 到 RZ 码型转换的新方案. 该方案的最大优点在于充分利用了光子晶体光纤的色散平坦特性, 通过独立设置两路抽运光波长, 实现了两路组播信号波长可灵活调节的目的. 这可充分满足光子网络对波长设置灵活性的需求, 且具有单抽运结构中对调制格式和比特率完全透明、易于与现有的超高速光纤通信系统连接等优点. 因此, 该研究工作对于 WDM/OTDM 混合光子网络的设计与实现具有一定的借鉴作用.

2 工作原理

图 1 为基于双抽运四波混频效应实现单到双全光码型转换的原理示意图. 待转换的 NRZ 码为加载数据的信号光, 由一束波长为 λ_s 的连续光波经强度调制器调制后产生. 两束抽运光为波长分别是 λ_{p1} , λ_{p2} 的周期窄脉冲序列, 其重复率与信号光比特率相同, 可看作是占空比相对较低的比特全“1”RZ 码, 将两束抽运光与信号光耦合后注入高线性光子晶体光纤, 由于光子晶体光纤在较宽波长范围内色散平坦, 均可满足相位匹配条件, 因此, 两束抽运光分别与信号光发生四波混频效应, 导致在相应波长位置有闲频光产生. 若适当控制信号光功率较大, 则在抽运光旁侧 (与信号光对应的地方) 就会产生出两束具有相对较大光学信噪比 (OSNR) 的闲频光, 并且它们所含原始信号光的信息较强. 根据能量动量守恒, 此两束闲频光的波长分别为

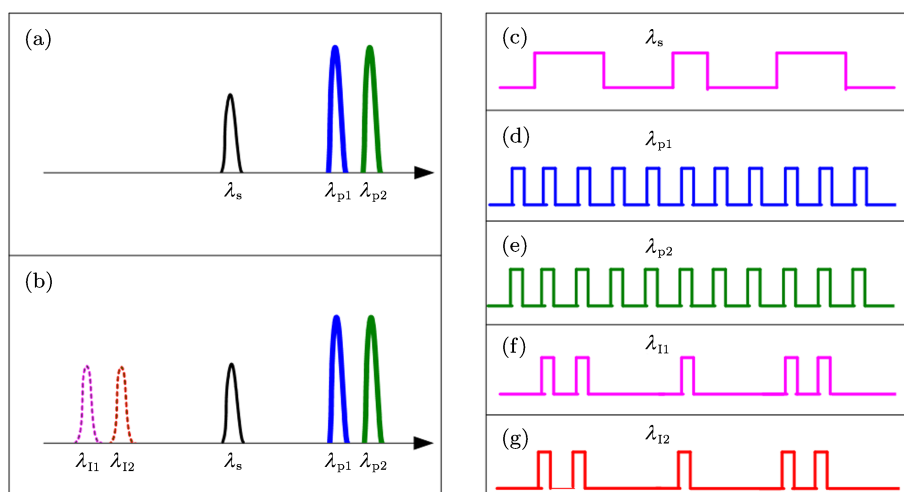


图 1 利用双抽运四波混频效应实现单到双全光 NRZ-RZ 码型转换的原理 (a) 输入光谱; (b) 输出光谱; (c) NRZ 信号波形; (d) 抽运光 1 波形; (e) 抽运光 2 波形; (f) 闲频光 1 (转换后的) RZ 波形; (g) 闲频光 2 (转换后的) RZ 波形

$$\lambda_{I1} = \lambda_{p1} \lambda_s / (2\lambda_{p1} - \lambda_s),$$

$$\lambda_{I2} = \lambda_{p2} \lambda_s / (2\lambda_{p2} - \lambda_s).$$

由于抽运光为比特全“1”的周期性短脉冲序列,只有信号光才携带了数据信息,而四波混频又相当于一个“与”门,对二者进行运算,产生闲频光波,且闲频光波所含数据信息与信号光完全相同,只是前者的脉宽远小于信号光脉冲宽度,因此这就实现了由NRZ码到RZ码的转换.图1(a)和(b)分别代表发生四波混频前后的光谱,图1(c)—(g)分别为对应时域信号光、抽运光1、抽运光2、闲频光1和闲频光2的波形.

虽然两束抽运光的相互作用也能产生四波混频边带项,但是它们不含数据信息,因此这些无用四波混频边带项的出现将会导致信道串扰,无益于码型转换.在实际应用中,可以调节双抽运光的偏振方向,使其互相垂直,但均与信号光的偏振方向成45°夹角,这就使得两束抽运光可分别与信号光实现四波混频,同时又能抑制由双抽运光所产生的四波混频边带项.因此,在图1中可忽略这些微弱的无用边带项.

3 实验装置与结果

图2是利用色散平坦高非线性光子晶体光纤中双抽运四波混频效应实现全光NRZ到RZ码型转换的实验装置图.首先使用波长可调谐激光器(Santec)产生一束波长为1548 nm的连续光波,经偏振控制器(PC1)后注入铌酸锂(LiNbO₃)强度调制器.射频(RF)信号源输出10 GHz的信号,同时驱动误码仪和主动锁模半导体激光器(AML-SL).误码仪中的伪随机码产生器(PPG)提供字节长度为2³¹-1,速率为10 Gbit/s伪随机比特序列(PRBS),用于驱动铌酸锂调制器,产生速率为10 Gbit/s,具有NRZ调制格式的数据光信号. AML-SL输出频率为10 GHz,波长为1550 nm的超短光脉冲序列.该序列经过高功率掺铒光纤放大器(HP-EDFA)后注入一根700 m的高非线性光纤(HNLF),在光纤内发生超连续谱效应.使用两个光学滤波器(OBPF2和OBPF3)分别在不同波长处滤出光信号,用于充当两路具有不同中心波长的短脉冲抽运光.这两束抽运光经过光耦合器(OC)后,再进一步与NRZ光信号耦合,然后一起注入另一个高功率掺铒光纤放大

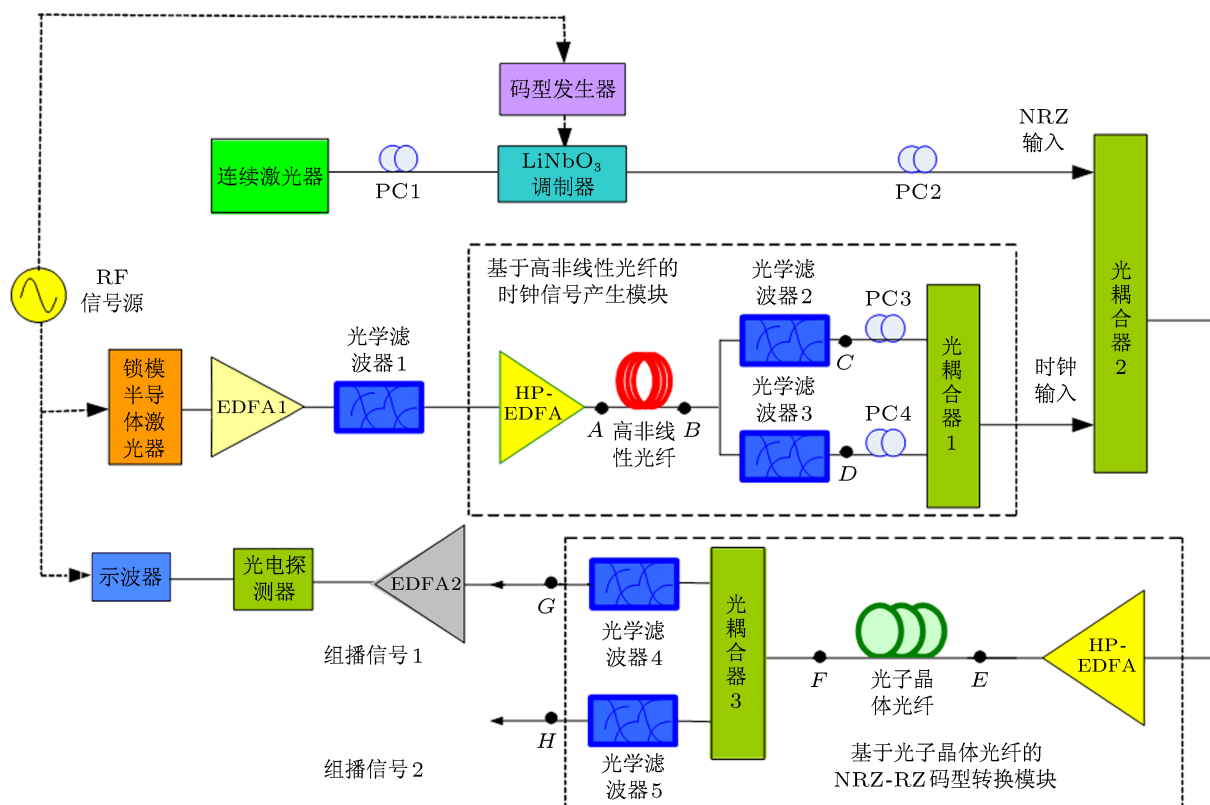


图2 利用光子晶体光纤中双抽运四波混频效应实现码型转换的实验装置

器, 最后输入 50 m 光子晶体光纤中 (PCF, POS-1550). 信号光与两束抽运光在 PCF 内分别独立发生四波混频效应, 在信号光旁侧产生两个边带, 完成全光码型转换功能. 在实验中, 使用光谱仪 (横河 AQ6370) 来测量 A 点至 H 点处的光谱, 使用 70 GHz 带宽的光电探测器 (PD: XPDV 3120R) 和示波器 (OSO: Agilent 86100C) 对光信号进行测量.

实验装置主要由时钟信号产生模块和码型转换模块组成, 两个模块的核心器件分别为 700 m 传统高非线性光纤和 50 m 色散平坦高非线性光子晶体光纤. 在第一个模块中, 超短光脉冲经功率放大后注入高非线性光纤, 在光纤内发生超连续谱效应, 光谱展宽达 30 nm. 在高非线性光纤输出端分束后, 使用两个波长可调谐光滤波器 OBPF2 (OTF950) 和 OBPF3 (OTF300) 同时滤出两路时钟信号, 滤波器中心波长分别为 1555.50 和 1558.52 nm, 使用光谱仪在高非线性光纤输入、输出以及滤波器输出端 (相应于图 2 中 A, B, C 和 D 点) 监测光谱, 记录结果如图 3. 将滤出的两路信号经过光电转换后进一步在示波器上监测, 得到图 4. 结果表明, 得到的时钟信号消光比 (extinction ratio, ER) 高, Q 因子大, 可以满足后续码型转换需求.

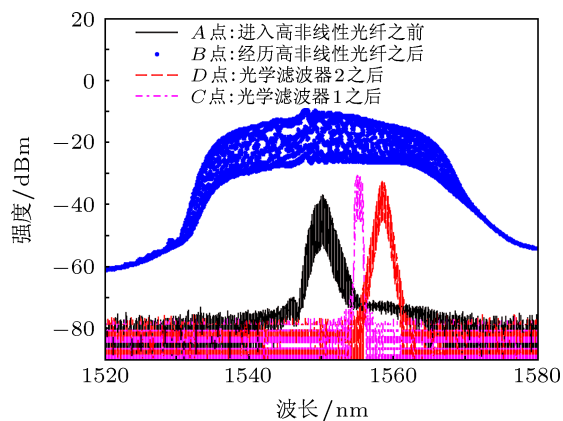


图 3 利用高非线性光纤中超连续谱效应产生时钟信号光谱

实验中, 两路时钟控制光和 NRZ 信号经光耦合器 (OC2) 后进入码型转换模块, 功率放大后注入 50 m 光子晶体光纤. 实验中, 调节 HP-EDFA2 的输出功率, 同时调节 PC2, PC3 和 PC4, 以改善各束光偏振态, 使双抽运四波混频效果最佳. 当 HP-EDFA2 输出功率为 26 dBm 时, 光谱监测显示在光子晶体光纤内发生明显的双抽运四波混频效应, 在光子晶体光纤输入、输出端、滤波器输出端 (图 2 中 E, F, G 和 H 点) 测量光谱得到图 5. 结果表明, 输入光

纤前只有待转换的 NRZ 信号光和两路时钟抽运光, 而经过光子晶体光纤后, 输出光谱表现出以下特点: 第一, 待转换的 NRZ 信号光光谱明显加宽, 这是由于抽运光调制了信号光相位所致; 第二, 两路时钟抽运光分别独立地与 NRZ 信号光发生四波混频效应, 在其两侧产生两组边带; 第三, 由于光子晶体光纤非线性系数较大, 且色散平坦, 导致有高阶四波

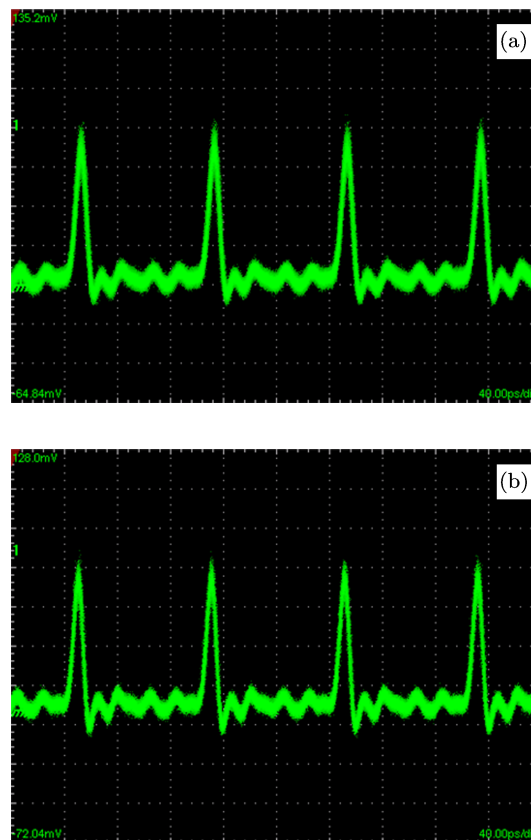


图 4 利用高非线性光纤中超连续谱效应得到时钟信号眼图每格 40 ps (a) 抽运时钟信号 ($\lambda_{p1} = 1555.50$ nm); (b) 抽运时钟信号 ($\lambda_{p2} = 1558.52$ nm) 的眼图

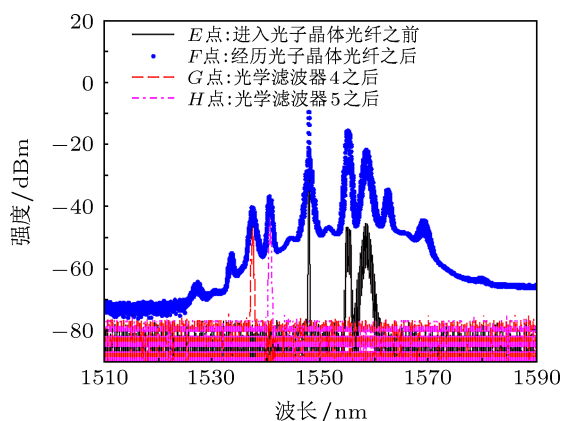


图 5 利用光子晶体光纤中双抽运四波混频效应实现码型转换的光谱

混频效应发生, 但高阶闲频光 OSNR 相对较低, 无法从中提取出信号光信息. 图 5 中两条较窄的谱线 (浅绿线和浅红线) 分别代表从滤波器滤出的两组闲频波光, 此二分量即对应于转换后得到的两路 RZ 信号.

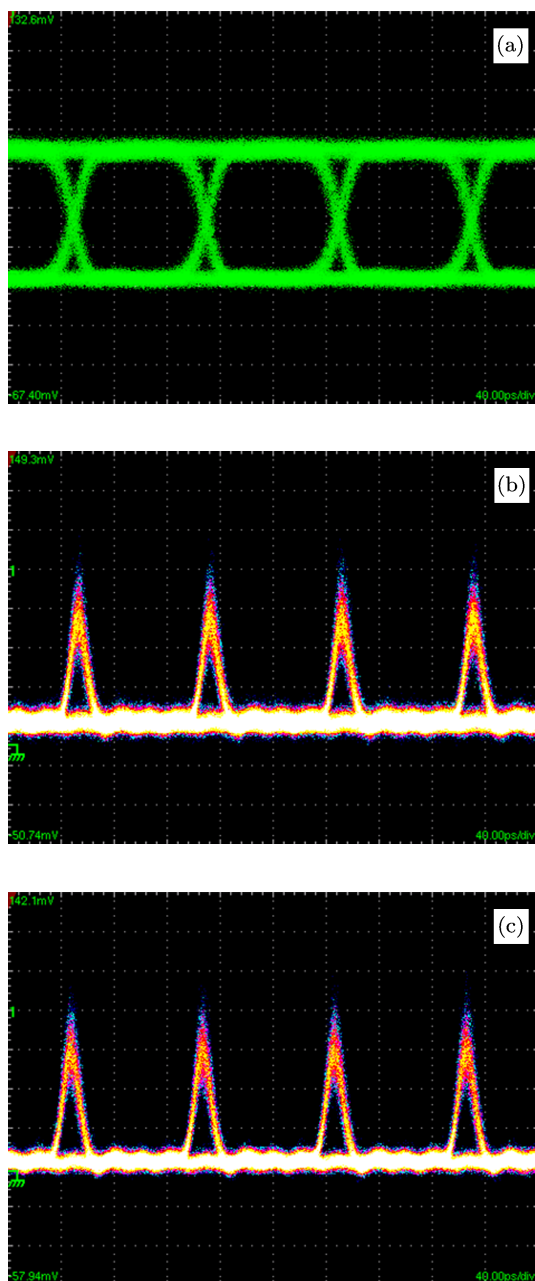


图 6 码型转换前后不同信号的眼图, 每格 40 ps (a) 原始 NRZ 信号 ($\lambda_s = 1548$ nm); (b) 码型转换后闲频光 2 ($\lambda_{i2} = 1537.48$ nm); (c) 闲频光 1 ($\lambda_{i1} = 1540.50$ nm) 对应的 RZ 信号眼图

为了进一步验证所设计码型转换器是否完成了码型转换功能, 用示波器监测转换光的时域特性. 首先使用可调谐光滤波器 (对应图 2 中的 OBPF4 和 OBPF5) 将左侧的两个一阶边带依次滤出, 滤波器的 3 dB 带宽为 0.36 nm, 中心波长在 1530—

1570 nm 连续可调, 将滤出的信号经过光电转换后在示波器上监测, 得到结果如图 6. 图 6(a) 为原始待变换的 NRZ 信号眼图, 图 6(b) 和 (c) 分别为将左侧两个一阶闲频光波分量 (波长 $\lambda_{i2} = 1537.48$ nm, 对应抽运光 $\lambda_{p2} = 1558.52$ nm) 和 (波长 $\lambda_{i1} = 1540.50$ nm, 对应抽运光 $\lambda_{p1} = 1555.50$ nm) 滤出, 得到的转换后的 RZ 信号眼图. 可见, NRZ 信号经过转换后比特 “1” 出现归零, 变为 RZ 信号, 并且眼图清晰, 说明实现了单到双的码型转换. 同时, 由于转换光与信号光波长不同, 说明设计的码型转换器同时实现了波长转换功能, 特别需要指出的是, 由于得到的两路 RZ 信号是由于双抽运四波混频效应引起的, 因此可以通过分别单独调节两路抽运光的中心波长, 实现灵活调节各路转换信号波长的目的, 进而满足大容量波分复用光子网络在波长开关/波长路由时对波长灵活性的需求, 这也是双抽运相对于单抽运四波混频的最大优点所在.

4 分析与讨论

4.1 波长调谐性

未来透明光子网络需要码型转换器具有较宽的波长调谐范围, 然而基于传统高非线性光纤的码型转换器, 工作波长范围非常有限. 本文提出基于光子晶体光纤中双抽运四波混频效应实现码型转换的方案, 由于此光纤在 1550 nm 附近色散平坦, 因此在该波长附近均可发生四波混频, 且通过单独改变其中一束抽运光波长, 可以实现对两束转换光波长独立调谐的目的, 这是基于单抽运四波混频效应的码型转换器所没有的优点. 为了证明所设计码型转换器的波长独立调谐功能, 实验中分别选取抽运光中心波长处于不同位置, 观察不同信号光与抽运光波长间距下的码型转换器性能. 理论上可以在超连续谱的 30 nm 光谱展宽范围内任意波长上得到抽运时钟信号, 但由于所用光学滤波器工作波长范围有限, 为保证双抽运四波混频效应所产生闲频光仍处于滤波器工作波长范围内, 可被作为转换后的 RZ 信号滤出, 实验中选择抽运光与信号光波长间距不能太远, 得到的典型光谱如图 7. 图 7(a) 和 (b) 分别为抽运波长在 1556.02/1559.83 nm 和 1557.86/1562.00 nm 的情况. 进入光子晶体光纤之前的光谱、在光子晶体光纤中发生双抽运四波混频效应后的输出光谱、以及将一阶边带滤出后得到的闲频波光谱分别对应图 2 中的 E, F, G 和 H

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, 而输出频率成分丰富, 说明发生了双抽运四波混频作用. 其中, 在信号光左侧, 与抽运光对应处出现的两个闲频光的 OSNR 较高, 将这两个分量在示波器上监测, 显示均得到了 RZ 码.

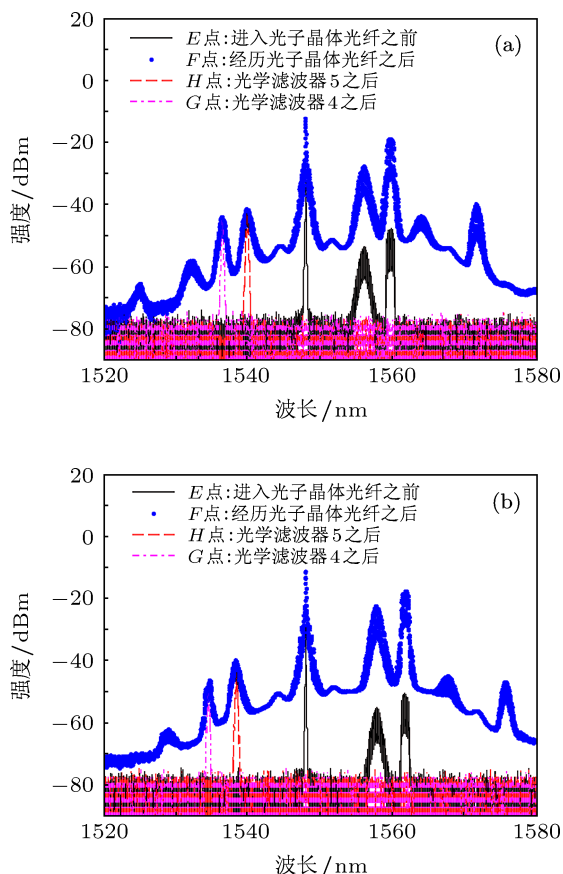


图 7 利用光子晶体光纤中双抽运四波混频效应实现 NRZ-RZ 码型转换的光谱 (a) $\lambda_{p1}/\lambda_{p2} = 1556.02/1559.83$ nm; (b) $\lambda_{p1}/\lambda_{p2} = 1557.86/1562.00$ nm

4.2 转换效率

对于以四波混频效应为基础的全光码型转换器而言, 转换效率是衡量全光码型转换器的重要参数. 在传统的高非线性光纤、半导体光放大器乃至化合物波导中, 其四波混频效率都比较低, 因此导致基于此效应的全光 NRZ 到 RZ 码型转换器转换效率低下. 而对于我们设计的全光码型转换器, 由于采用了新型高非线性光子晶体光纤, 其良好的非线性及色散特性, 使得在较宽波长范围内均取得了令人满意的转换效率. 实验中, 我们测量了不同波长范围内的码型转换效率, 得到结果如图 8 所示. 可见, 码型转换器呈现出在 1556 nm 附近转换效率最高, 往两端逐渐降低的趋势, 分析认为这与光子

晶体光纤的色散特性相关.

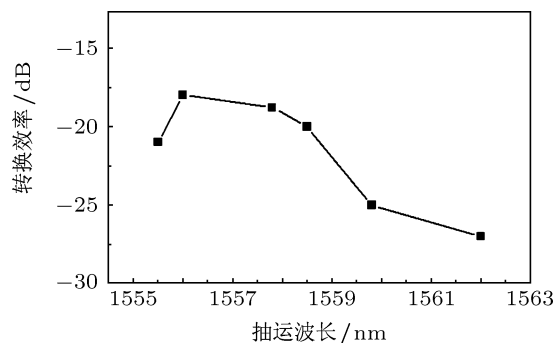


图 8 转换效率与波长的关系

4.3 对输入功率波动的容忍性

对基于非线性光学效应工作的器件而言, 输入光功率的变化会影响器件性能, 若功率过小, 则相应非线性效应变弱, 使得器件不能正常工作; 反之, 若光功率较大, 则会导致其他非线性效应发生, 影响光网络性能. 而在实际的光子网络中, 由于温度等环境因素的随机起伏以及光纤弯曲等不可预料的条件变化, 往往导致光网络中的光功率发生波动, 影响系统性能. 因此, 测量光子晶体光纤基码型转换器对输入光功率波动的容忍性, 具有工程实用价值. 实验中, 我们通过连续调节 HP-EDFA 的抽运电流, 系统测量了输入光功率从 25 到 27.5 dBm 时光纤中双抽运四波混频效应的强弱, 以及转换得到的 RZ 信号的 Q 因子, ER, 眼图张开因子 (eye open factor, EOF) 和均方根抖动 (RMS jitter), 得到不同输入功率下光谱演化如图 9, 信号质量如图 10. 结果表明, 当输入光功率较低时, 双抽运四波混频效应很微弱, 无法得到码型转换信号, 随着输入功率增大, 四波混频效应增强, 但转换信号 ER 很低. 输入功率进一步增大, 闲频光的 OSNR 开始大于 10dB, 转换信号的眼图逐渐清晰. 对于转换得到的双通道 RZ 信号, 我们发现: 在整个输入光功率变化范围内, 组播信道 1 的信号质量整体优于组播信道 2; 在 25—27.5 dBm 范围内, 转换信号的 Q 因子, ER, EOF 均随着输入光功率的增大而增大, 而均方根抖动随着输入光功率的增大而减小.

5 结论

提出并实验证实了一种基于高非线性色散平坦光子晶体光纤的单到双全光 NRZ-RZ 码型转换器. 该器件利用光子晶体光纤中的双抽运四波混频

原理工作, 通过单独改变两束抽运光波长, 可以实现两路组播信号波长独立调谐的目的. 所设计的码型转换器充分利用光子晶体光纤特有的平坦色散与高非线性特性, 克服了传统光纤需要较长长度/较大功率、输出波长不能灵活设置的弊端, 所得转换

信号的最优 ER 和 Q 因子分别为 15 dB 和 5.4. 整个系统具有对信号调制格式和比特率透明的优点, 且完成了波长转换和波长组播功能, 这些研究对于超高速 WDM/OTDM 混合光子网络的设计实现和工程应用具有重要参考意义.

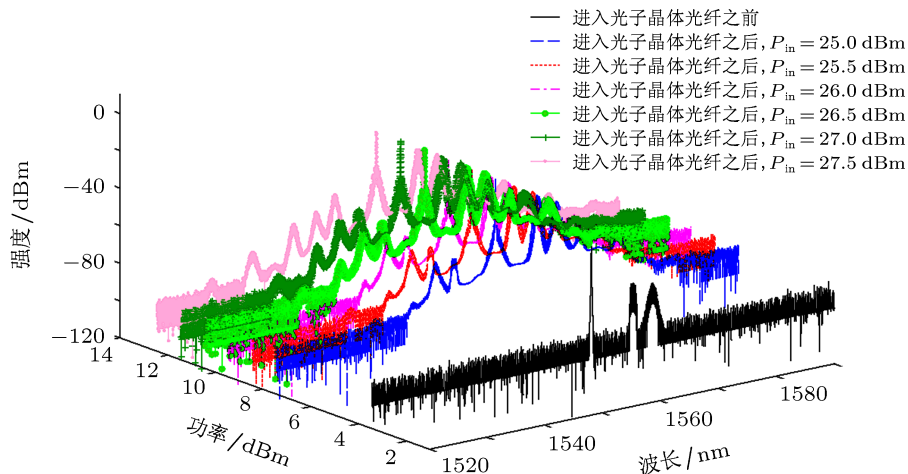


图9 不同光功率下 NRZ-to-RZ 码型转换器的光谱演化 ($\lambda_s = 1548$ nm, $\lambda_{p1}/\lambda_{p2} = 1555.50/1558.52$ nm)

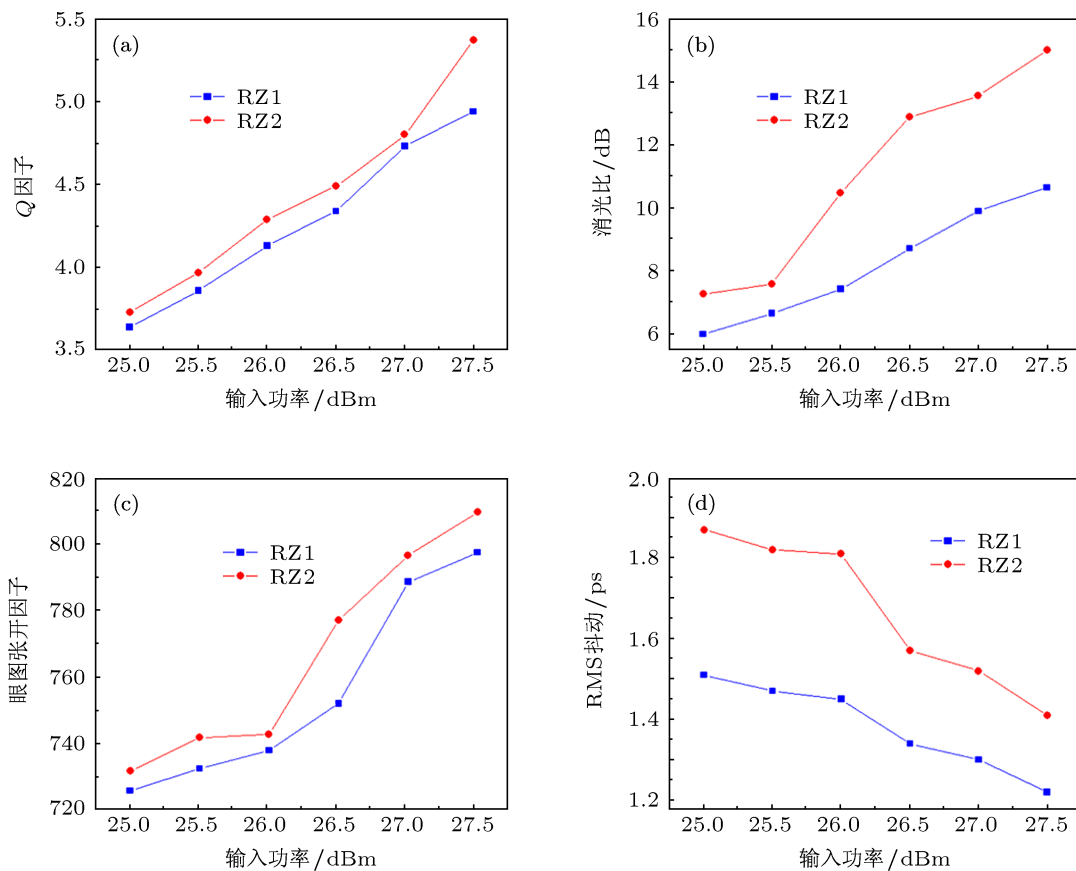


图10 光功率对转换信号质量的影响 (a) Q 因子; (b) ER; (c) 眼图张开度; (d) RMS 抖动

- [1] Willner A E, Yilmaz O F 2010 *IEEE J. Select. Top. Quantum Electron.* **16** 320
- [2] Hayashi M, Tanaka H, Ohara K, Otani T 2002 *J. Lightwave Technol.* **20** 236
- [3] Kwok C H, Lin C 2006 *IEEE J. Select. Top. Quantum Electron.* **12** 451
- [4] Norte D, Willner A E 1995 *IEEE Photon Technol. Lett.* **7** 1354
- [5] Chou H F, Bowers J E 2007 *IEEE J. Select. Top. Quantum Electron.* **13** 58
- [6] Huo L, Dong Y, Lou C Y, Gao Y Z 2003 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **15** 981
- [7] Zhao X F, Lou C Y, Zhou H B, Lu D, Huo L 2010 *Opt. Express* **18** 23657
- [8] Yu Y, Zhang X L, Rosas-Fernández J B, Huang D X 2009 *Opt. Express* **17** 3964
- [9] Chow C W, Wong C S, Tsang H K 2002 *Opt. Commun.* **209** 329
- [10] Lin G, Yu K, Chang Y 2006 *Opt. Lett.* **31** 1376
- [11] Chen Z X, Wu J, Xu K, Lin J T 2007 *Opt. Eng.* **46** 080502
- [12] Wang J, Sun J Q, Sun Q Z 2007 *Opt. Lett.* **32** 2462
- [13] 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]
- [14] Wang J, Sun J, Zhang X, Huang D 2009 *IEEE J. Quantum Electron.* **45** 195
- [15] Zhou L, Chen H, Poon A W 2008 *IEEE J. Lightwave Technol.* **26** 1950
- [16] Ye T, Yan C, Lu Y, Liu F, Su Y 2008 *Opt. Express* **16** 15325
- [17] Yan C, Ye T, Su Y 2009 *Opt. Lett.* **34** 58
- [18] Kuo B P P, Chui P C 2008 *IEEE J. Lightwave Technol.* **26** 3770
- [19] Yin L, Yan Y, Zhou Y, Wu J, Lin J 2006 *Chin. Opt. Lett.* **4** 4
- [20] Noel L, Shan X, Ellis A D 1995 *IEEE Electron. Lett.* **31** 277
- [21] Xie Y Y, Zhang J G, Wang W Q 2008 *J. Modern Opt.* **55** 3021
- [22] Willner A E, Jeffrey B D 2010 *IEEE J. Select. Top. Quantum Electron.* **16** 234
- [23] Hui Z Q 2011 *Laser Phys.* **21** 1219
- [24] Yang X, Mishra A K, Manning R J, Giller R 2007 *IEEE Electron. Lett.* **43** 469
- [25] Bill P P K, Chui P C, Wong K K Y 2008 *J. Lightwave Technol.* **26** 3770
- [26] Dong J J, Zhang X L, Wang F, Yu Y 2008 *IEEE Electron. Lett.* **44** 763
- [27] Yu C, Yan L S, Luo T, Wang Y 2005 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **17** 636
- [28] Yan L S, Yi A L, Pan W, Luo B, Ye J 2010 *Opt. Express* **18** 21404
- [29] Hui Z Q, Zhang J G 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 014217 (in Chinese) [惠战强, 张建国 2012 物理学报 **61** 014217]
- [30] Apiratikul P, Astar W, Carter G M 2010 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **22** 872
- [31] Russell P 2003 *Science* **299** 358
- [32] Zsigri B, Peucheret C 2006 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **18** 2290
- [33] Fok M P, Shu C 2007 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **19** 1166
- [34] Hu M L, Wang Q Y, Li Y F, Wang Z, Zhang Z G, Chai L, Zhang R B 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 4243 (in Chinese) [胡明列, 王清月, 栗岩峰, 王专, 张志刚, 柴路, 章若冰 2004 物理学报 **53** 4243]

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

Hui Zhan-Qiang¹⁾ Zhang Jian-Guo²⁾

1) (*School of Electronic Engineering, Xi'an University of Posts and Telecommunications, Xi'an 710121, 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 1 June 2012; revised manuscript received 21 December 2012)

Abstract

A novel all-optical format conversion scheme based on dual-pump four-wave-mixing (DP-FWM) in dispersion-flattened highly nonlinear photonic crystal fiber (DF-HNL-PCF) is proposed and experimentally demonstrated. The original non-return-to-zero (NRZ) format is converted into double return-to-zero (RZ) format by injecting NRZ signal and double synchronized clock signals into the DF-HNL-PCF. The DP-FWM effect generates two sideband components, which carry the same data information as the original NRZ signal with RZ format. The wavelength tunability and dynamic range of format converter are investigated. The optimum extinct ratio and Q factor of converted signals are 15 dB and 5.4, respectively. The advantages of this scheme are that the each wavelength of double channel multicasting signals is dependent and flexible. Moreover, the system is transparent to bit rate as well as modulation format, and achieves all-optical wavelength conversion and wavelength multicasting.

Keywords: format conversion, four-wave mixing, dual-pump, photonic crystal fiber

PACS: 42.65.-k, 42.79.Sz, 42.79.Nv, 42.70.Qs

DOI: 10.7498/aps.62.084209

* Project supported by the Chinese Academy of Sciences/ State Administration of Foreign Experts Affairs (CAS/SAFEA) International Partnership Program for Creative Research Teams and the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61201193).

† Corresponding author. E-mail: zhanqianghui@xupt.edu.cn