

基于光子晶体光纤中多抽运四波混频效应的 新型光层组播技术*

惠战强¹⁾²⁾ 张建国^{1)†}

1)(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)

2)(西安邮电学院电信系, 西安 710061)

(2010年8月13日收到; 2010年9月9日收到修改稿)

光层组播是未来透明光子网络中一项重要的全光信号处理功能, 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多抽运四波混频效应的光层组播方法, 将一束信号光与两束连续抽运光同时输入高非线性光子晶体光纤中, 通过多抽运四波混频过程, 产生四个携带该数据信息的闲频光, 从而实现了单一信号的四信道光层组播功能, 组播信道波长在 35.2 nm 范围可调谐, 组播信道最大间距 4.4 THz, 最大转换效率 -22 dB, 最优 Q 因子为 5.3, 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和扩展信道的能力, 且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相容等优点, 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: 光层组播, 多抽运四波混频, 光子晶体光纤

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

1. 引言

组播, 又称多播, 是一种允许一个或多个发送方发送单一数据包到多个接收方(一次性、同时性)的网络通信技术, 是未来透明光子网络中一项必不可少的光信号处理功能^[1]. 它的主要特点是一点对多点的信息传播, 能够使一个或多个组播源只把数据包发送给特定的组播小组, 只有加入该组播小组的主机才能接收到数据包, 而小组外的其他用户接收不到. 组播技术能够支持众多带宽密集型城域网应用业务, 如网络电视, 远程医疗, 视频会议, 虚拟现实游戏, 光存储网络等^[2,3], 有效避免了传统采用重复点对点通信方式, 或采用广播方式所导致的对网络资源的严重浪费, 大大减轻了网络的负载和发送者的负担, 增强了网络对业务选路的灵活性, 丰富了网络的逻辑链接拓扑, 因此具有重要的应用价值和现实意义. 当前, 随着全光网络技术的深入发

展和用户需求的多样化, 光层组播业务日益成为一种重要的业务模式, 引起人们越来越广泛的关注.

组播技术的发展可以分为两个阶段, 第一阶段是指传统的组播技术发展期, 它的特点是按照 IP 组播的方式在电域进行, 主要依靠高频电子器件, 经过光—电—光变换实现, 虽然在发展早期支持了一些组播业务, 为丰富网络的功能做出了一定贡献, 但仍具有设备昂贵且受电子器件“速率瓶颈”限制等弊端, 因此人们发展了第二代全光组播方式, 即光层组播方式. 目前已有的光层组播方式主要有以下两种: 基于分光器的组播方式和基于各种非线性效应的组播方式, 前者易于实现, 发展较为成熟, 但是由于分光器中每路信号的分光比一般固定不变, 不能根据用户需求灵活控制, 从而限制了系统的级联扩展能力, 同时, 分光器会带来较大的功率损耗, 导致网络资源被白白浪费, 并且, 这种结构往往需要光放大器来补偿功率消耗, 导致成本升高, 并且放大器中不可避免的自发辐射噪声会降低信号的信噪比, 最终使系统的误码率增加; 后者主要有基

* 中国科学院知识创新工程(批准号: KGCX2-YW-108)和“百人计划”项目资助的课题.

† 通讯联系人. Email: zqhui@opt.ac.cn

于准相位匹配周期极化铌酸锂波导中级联二次谐波产生效应^[4], 基于电吸收调制器中交叉吸收调制^[5], 四波混频效应^[6], 基于半导体光放大器中的双步交叉增益调制^[7], 交叉相位调制^[8], 交叉偏振调制^[9], 四波混频效应^[10], 基于高非线性光纤中四波混频^[11-12], 超连续谱产生效应^[13], 基于拉曼辅助色散位移光纤中交叉相位调制^[14], 基于光子晶体光纤中的自相位调制^[15]和四波混频效应^[16]等. 其中, 基于四波混频效应的组播技术具有对信号比特率和调制格式透明的优点, 因此颇具发展前景, 它进一步可以分为三类, 第一种是采用单一信号光和抽运光, 同时提高其输入功率, 通过级联四波混频效应, 产生多个新频率光波^[17], 完成组播功能; 第二种为利用两个甚至更多抽运光与信号光波相互作用, 仅基于一阶四波混频效应, 产生若干个带有组播信息的新频率光波, 从而完成组播功能^[9-11, 18]; 第三种为将前两种方法组合起来, 同时利用了一阶和二阶四波混频效应, 组播信号的一部分来源于信号光与抽运光的一阶四波混频产生的闲频光, 另一部分来源于抽运光之间产生的闲频波(不携带任何信息), 再进一步与原始信号光发生四波混频效应(属二阶四波混频效应), 而产生的闲频波^[19]. 但半导体光放大器中的四波混频效应效率低下, 传统色散位移光纤又需要将信号光与抽运光波长设置在光纤零色散点附近^[10], 限制了组播技术的灵活性. 新出现的光子晶体光纤, 避免了传统光纤的弊端, 它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^[20-21], 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, 具有响应速度快, 结构简单, 性能可靠, 且易于与现有的商用化超高速光纤通信系统连接等优点, 非常具有发展前景. 本文利用色散平坦高非线性光子晶体光纤中的多抽运四波混频效应, 首次将光子晶体光纤中的多抽运四波混频耦合波方程理论与实验结合, 实现了速率为 10 Gbit/s 的四路信号的同时组播, 组播信号在 35.2 nm 波长范围内宽带可调谐, 并进一步测量了组播效率与组播信号的 Q 因子, 理论计算与实验结果基本符合, 这些工作对未来透明光子网络的发展具有重要促进作用.

2. 理论分析

基于色散平坦高非线性光子晶体光纤中多抽

运四波混频效应实现全光组播的原理可以简述如下, 经过调制的高速信号光(频率为 ω_{1s}) 和两束连续抽运光(频率分别为 ω_{2p}, ω_{3p} ,)经过功率放大后进入光子晶体光纤, 如图 1(a), 由于高非线性光子晶体光纤色散平坦, 因此在较宽波长范围内均可满足相位匹配条件, 信号光与邻近抽运光(ω_{2p}) 的频率差为 $\Delta\omega$ ($\Delta\omega = \omega_{1s} - \omega_{2p}$), 经过四波混频相互作用, 在其两侧分别产生两束闲频光(其频率为 $\omega_4 = \omega_{1s} + \Delta\omega, \omega_5 = \omega_{2p} - \Delta\omega$), 由于抽运光为连续光, 不携带任何信息, 所以信号光的信息便转换到了此闲频光上, 同时, 由于信号光与抽运光发生拍频作用, 形成了折射率光栅, 该光栅同时散射了另外一束抽运光, 分别在它们两侧形成了两个边带(即 ω_6, ω_7), 该边带也携带了信号光的信息, 如图 1(b), 因此, 信号光的信息便同时转换到了多束闲频光波上, 完成了全光组播功能.

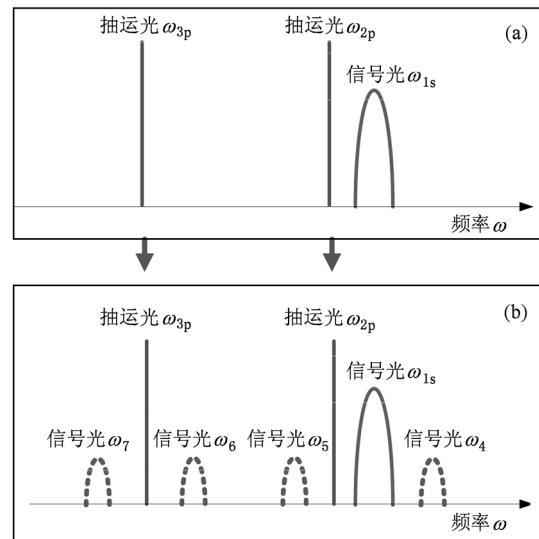


图 1 全光组播原理图

我们不妨假设信号光频率为 ω_1 , 抽运光频率分别为 ω_2, ω_3 , 组播信号频率依次为 $\omega_4, \omega_5, \omega_6, \omega_7$, 忽略其他较小高阶四波混频项, 则共有七束光波在光子晶体光纤中传播, 总电场可以写为

$$\mathbf{E} = \frac{1}{2} \hat{x} \sum_{m=1}^7 E_m \exp[i(\beta_m z - \omega_m t)] + \text{c. c.}, \quad (1)$$

考虑非线性极化作用后, 在光子晶体光纤中传输的光波可由以下波动方程描述^[22]:

$$\nabla^2 \mathbf{E} - \frac{n_0^2}{c^2} \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} = \mu_0 \frac{\partial \mathbf{P}_{NL}}{\partial t^2}, \quad (2)$$

其中, n_0 为折射率系数, 可表述为 $n_0 = (1 + \chi^{(1)})^{1/2}$, $\chi^{(1)}$ 为线性电极化率.

三阶非线性电极化强度为

$$P_{NL} = \epsilon_0 \chi^{(3)} : EEE, \quad (3)$$

$\chi^{(3)}$ 为三阶电极化率. 将(1)式代入(3)式, 得到

$$\begin{aligned} P_{NL} &= \frac{1}{2} \hat{x} \sum_{j=1}^7 P_{NL,j} \exp[i(\beta_j z - \omega_j t)] + c. c. \\ &= \frac{1}{8} \epsilon_0 \chi^{(3)} \hat{x} \sum_{k,l,m} E_k E_l E_m \\ &\quad \times \exp\{i[(\beta_k z - \omega_k t) + (\beta_l z - \omega_l t) \\ &\quad + (\beta_m z - \omega_m t)]\}, \end{aligned} \quad (4)$$

其中, $k, l, m = \pm 1, \pm 2, \dots, \pm 7$, $P_{NL,j}$ ($j = 1, 2, \dots, 7$) 由包含三个电场强度之积的许多项组成, 包括自相位调制, 交叉相位调制, 各种简并和非简并四波

混频过程等, 例如, $P_{NL,4}$ 可以表示为

$$\begin{aligned} P_{NL,4} &= \frac{3}{4} \epsilon_0 \chi^{(3)} \left[\left(|E_4|^2 + 2 \sum_{j \neq 4} |E_j|^2 \right) E_4 \right. \\ &\quad + 2E_1 E_2 E_5^* \exp(i\theta_{1254}) \\ &\quad + 2E_1 E_6 E_3^* \exp(i\theta_{1634}) \\ &\quad + 2E_1 E_3 E_7^* \exp(i\theta_{1374}) \\ &\quad \left. + E_1^2 E_2^* \exp(i\theta_{1124}) \right], \end{aligned} \quad (5)$$

其中 $\theta_{klm} = [\beta(\omega_j) + \beta(\omega_k) - \beta(\omega_l) - \beta(\omega_m)]z - (\omega_j + \omega_k - \omega_l - \omega_m)$, 将(4)式代入(2)式, 在准连续波近似和慢变振幅近似下^[23-26], 上述多抽运四波混频过程最终可以用以下的耦合波方程描述:

$$\begin{aligned} \frac{\partial A_1}{\partial z} &= i\gamma_1 [A_1 + 2A_2 A_6 A_3^* e_{1263} + 2A_2 A_3 A_7^* e_{1237} + 2A_2 A_4 A_1^* e_{1241} + 2A_4 A_5 A_2^* e_{1452} \\ &\quad + 2A_4 A_3 A_6^* e_{1436} + 2A_4 A_7 A_3^* e_{1473} + A_2^2 A_5^* e_{1225}], \end{aligned} \quad (6a)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial A_2}{\partial z} &= i\gamma_2 [A_2 + 2A_1 A_5 A_2^* e_{2152} + 2A_1 A_3 A_6^* e_{2136} + 2A_1 A_7 A_3^* e_{2173} + 2A_5 A_4 A_1^* e_{2541} \\ &\quad + 2A_5 A_3 A_7^* e_{2537} + 2A_5 A_6 A_3^* e_{2563} + A_1^2 A_4^* e_{2114}], \end{aligned} \quad (6b)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial A_3}{\partial z} &= i\gamma_3 [A_3 + 2A_7 A_6 A_3^* e_{3763} + 2A_7 A_2 A_5^* e_{3725} + 2A_7 A_1 A_2^* e_{3712} + 2A_7 A_4 A_1^* e_{3741} \\ &\quad + 2A_6 A_5 A_2^* e_{3652} + 2A_6 A_2 A_1^* e_{3621} + 2A_6 A_1 A_4^* e_{3614}], \end{aligned} \quad (6c)$$

$$\frac{\partial A_4}{\partial z} = i\gamma_4 [A_4 + 2A_1 A_2 A_5^* e_{4125} + 2A_1 A_6 A_3^* e_{4163} + 2A_1 A_3 A_7^* e_{4137} + A_1^2 A_2^* e_{4112}], \quad (6d)$$

$$\frac{\partial A_5}{\partial z} = i\gamma_5 [A_5 + 2A_2 A_1 A_4^* e_{5214} + 2A_2 A_3 A_6^* e_{5236} + 2A_2 A_7 A_3^* e_{5273} + A_2^2 A_1^* e_{5221}], \quad (6e)$$

$$\frac{\partial A_6}{\partial z} = i\gamma_6 [A_6 + 2A_3 A_2 A_5^* e_{6325} + 2A_3 A_1 A_2^* e_{6312} + 2A_3 A_4 A_1^* e_{6341} + A_3^2 A_7^* e_{6337}], \quad (6f)$$

$$\frac{\partial A_7}{\partial z} = i\gamma_7 [A_7 + 2A_3 A_5 A_2^* e_{7352} + 2A_3 A_2 A_1^* e_{7321} + 2A_3 A_1 A_4^* e_{7314} + A_3^2 A_6^* e_{7336}], \quad (6g)$$

上式中, $A_n = \left(|A_n|^2 + 2 \sum_{j \neq n} |A_j|^2 \right) A_n$, $n = 1, 2, 3, \dots, 7$, 包括自相位和交叉相位调制项, 等式右边其他项为四波混频项, 其中

$$\begin{aligned} e_{jklm} &= \exp\{i[\beta(\omega_k) + \beta(\omega_l) - \beta(\omega_m) - \beta(\omega_j)]z\}, \\ j(k, l, m) &= 1, 2, 3, \dots, 7, \end{aligned}$$

上述方程组是一个关于光场复振幅的自恰系统, 描述了七个光波之间的相互作用, 例如, 频率为 ω_1 的光波与以下各项均有关 $A_2 A_6 A_3^* e_{1263}$, $A_2 A_3 A_7^* e_{1237}$, $A_2 A_4 A_1^* e_{1241}$, $A_4 A_5 A_2^* e_{1452}$, $A_4 A_3 A_6^* e_{1436}$, $A_4 A_7 A_3^* e_{1473}$, $A_2^2 A_5^* e_{1225}$, 频率为 ω_2 的组播信号与 $A_1 A_5 A_2^* e_{2152}$, $A_1 A_3 A_6^* e_{2136}$, $A_1 A_7 A_3^* e_{2173}$, $A_5 A_4 A_1^* e_{2541}$, $A_5 A_3 A_7^* e_{2537}$,

$A_5 A_6 A_3^* e_{2563}$, $A_1^2 A_4^* e_{2114}$ 各项均有关. 所以, 当信号光 ω_1 上加载了通过强度调制的数据信号以后, 信号光强随时间变化, 从而使得经过四波混频产生的新生光频分量(闲频光波)的强度也相应变化, 因此, 信号光携带的信息便复制到了闲频光波(即 $\omega_4, \omega_5, \omega_6, \omega_7$)上, 完成了全光组播功能.

对于耦合波方程(6a) — (6g), 我们通过数值计算进行求解, 计算中光波参数选取如下: 信号光为平均功率 20 dBm 的双曲正割脉冲序列, 其中重复频率 10 GHz, 脉冲宽度 6 ps, 中心波长为 1551.8 nm; 误码仪发出的射频(RF)信号用 $2^{23} - 1$ 伪随机比特序列(PRBS,)模拟, 抽运光为连续光, 功率为

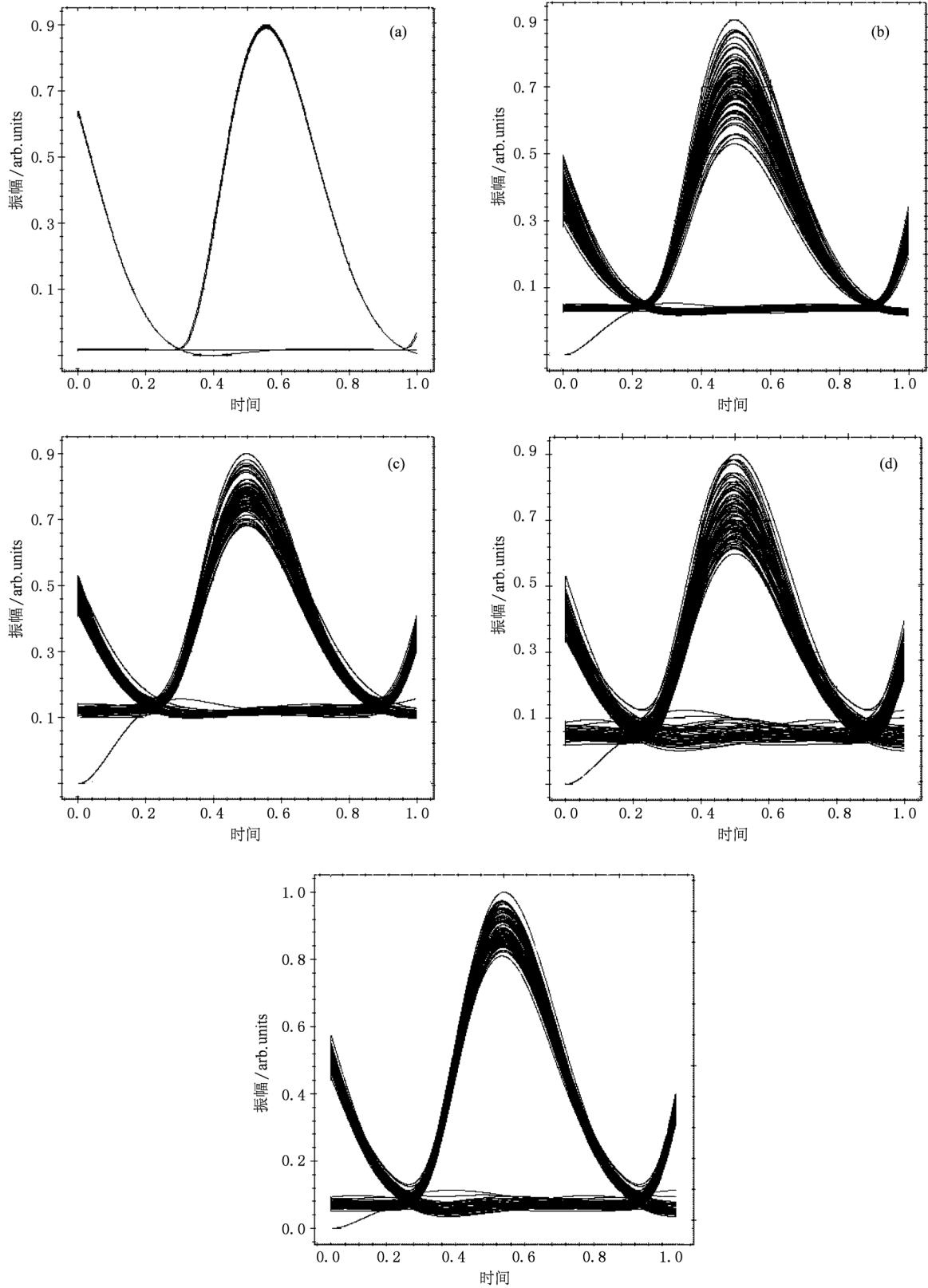


图2 基于光子晶体光纤中多四波混频效应的全光组播数值模拟结果 (a)原始信号眼图, $\lambda_s = 1551.8 \text{ nm}$; (b)组播信号1眼图, $\lambda_{\text{multicast-1}} = 1554.6 \text{ nm}$; (c)组播信号2眼图, $\lambda_{\text{multicast-2}} = 1546.2 \text{ nm}$; (d)组播信号3眼图, $\lambda_{\text{multicast-3}} = 1540.6 \text{ nm}$; (e)组播信号4眼图, $\lambda_{\text{multicast-4}} = 1535 \text{ nm}$

22 dBm, 波长分别设置为 1549 nm, 1537.8 nm; 光子晶体光纤参数选取与实际光纤条件一致, 非线性系数为 $11 \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$, 长度为 100 m, 在 1550 处色散为 $0.6 \text{ ps} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$, 在 1535 和 1580 nm 范围内色散斜率为 $0.005 \text{ ps} \cdot \text{nm}^{-2} \cdot \text{km}^{-1}$, 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. 信号光的原始眼图模拟如图 2(a), 我们在计算中对信号光按时间进行离散, 认为每一时刻的信号光功率恒定, 然后在不同离散时刻求解耦合波方程, 便可得到各组播信号的输出光场, 计算得到的各组播信号 (即图 1 中 $\omega_4, \omega_5, \omega_6, \omega_7$) 的眼图如图 2(b)–(e). 由图可见, 信号光携带的信息有效复制到了四束闲频光上, 且眼图清晰, 张开度好, 说明实现了组播功能.

3. 实验装置与结果

实现全光组播的实验装置如图 3, 主动锁模半导体激光器发出重复频率为 10 GHz 的超短脉冲序列, 脉宽为 1.9 ps, 中心波长为 1551.8 nm, 经过滤波器 (OBPF1) 后, 脉冲宽度变为 6.1 ps, 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 伪随机电信号, 然后驱动 10 Gbit/s 铌酸锂调制器, 产生一个重复频率为 10 GHz 的光信号, 此信号经过高功率掺铒光纤放大器 (HP-EDFA₁, Keopsys 公司生产, 工作波长范围 1535–1565 nm, 饱和输出功率 34 dBm, 噪声指数小于 6 dB) 放大, 然后作为待组播的原始数据信号, 抽运光 1, 2 分别由连续光源 1 (Santec 公司 MLS-2100 型, 线宽 100 MHz)、连续光源 2 (Newfocus 公司, 线宽 300 MHz) 产生, 均可在 C 波段连续可调谐. 抽运光 1 和抽运光 2 先后经过衰减器和偏振控制器后, 由偏振分束器耦合, 经过高功率掺铒光纤放大器 (HP-EDFA₂, Amonics 公司生产, 工作波长范围 1535–1565 nm, 饱和输出功率 34 dBm, 典型噪声指数小于 6.5 dB) 后再与信号光经过 2×1 耦合器耦合, 后进入 100 m 光子晶体光纤, 在其中发生多抽运四波混频效应, 在每一个抽运光的两侧分别产生两个边带, 完成全光组播功能. 实验中, 我们用光谱仪 (横河 AQ6370 分辨率 0.02 nm) 来测量光谱, 使用 50 GHz 带宽光电探测器 (U²T 型号 XPDV1020R) 完成光电转换功能, 并配以 70 GHz 带宽高速采样示波器 (Agilent model 86100C) 来测量波形和眼图.

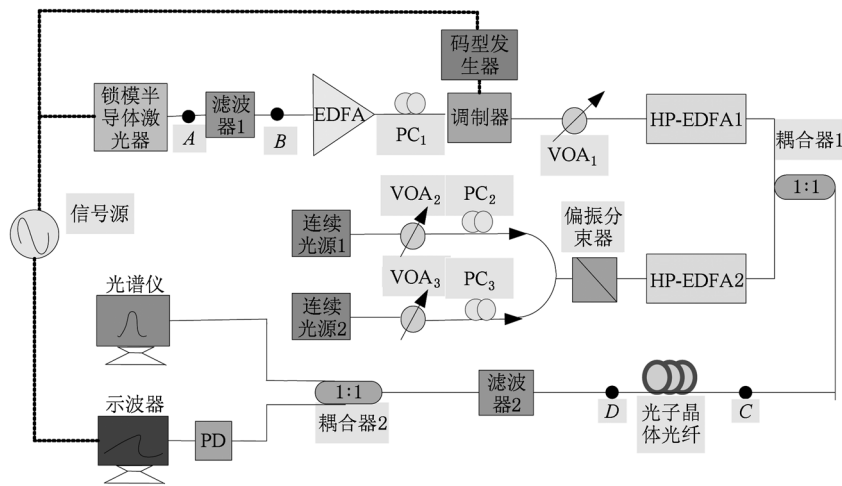


图 3 基于高非线性光子晶体光纤中多四波混频效应实现全光组播的实验装置图

由于实验中主动锁模半导体激光器发出的超短脉冲时域宽度仅 1.9 ps, 根据时域与频域的相互制约关系, 其光谱一般较宽, 因此当信道间距较小时, 容易导致多抽运四波混频过程中各闲频光波光谱分量之间重叠, 进而引起各信道间的串扰, 因此, 我们先对超短脉冲进行滤波, 实验中所使用的滤波器 1 为 Santec 公司 OTF950 型 (中心波长在 1525—

1565 nm, 带宽 0.25—3 nm 范围可调谐), 它的作用在于提取超短脉冲光谱分量的有效部分, 我们将其中心波长设置为 1551.8 nm, 带宽为 0.8 nm, 用自相关仪测量其滤波前后的脉宽 (对应在图 3 中的 A 与 B 点) 分别为 1.9 ps 和 6.1 ps.

实验中, 两束连续抽运光的波长分别设置为 1537.8 nm, 1549 nm, 连续光 1 和 2 经过偏振分束器

耦合,目的在于确保此两束光偏振方向相互垂直,进而避免它们之间发生不需要的四波混频效应,偏振控制器分别用来调节每束光的偏振态,目的在于优化所需要的四波混频过程,同时抑制不需要的四波混频过程,抽运光与信号光之间的功率比也要仔细调节,若抽运光功率太小,不能有效实现组播功能,若抽运光功率过大,则由于偏振分束器有限的消光比,导致抽运光彼此之间发生不需要的四波混频现象. 为了保证有较强的四波混频作用发生,我们采用高功率掺铒光纤放大器来放大信号光与抽运光,实验中进入光子晶体光纤的总功率为 27 dBm,我们分别在光子晶体光纤的输入输出端(对应图 3 中的 C 和 D 点)测得其光谱如图 4(a), (b) 所示,可见,在进入光子晶体光纤之前只有信号光和两束连续抽运光,而经过多抽运四波混频效应,在

输出端光谱成分变得丰富,产生多束闲频光,在抽运光两侧均出现边带,边带所出现的波长测量值分别为 1554. 6nm, 1546. 2nm, 1540. 6nm, 1535nm, 与图 1 理论分析完全符合. 输出光谱还有一个明显特征,那就是原本线宽很窄的连续抽运光,光谱发生展宽,这是由于信号光与抽运光之间发生的交叉相位调制效应导致的,实际中也有人利用交叉相位调制效应结合边带滤波实现全光组播功能,但需要不断优化实验参数,确保交叉相位调制效果最强,这一点超出了本文的讨论范畴,我们将在以后的研究中论述. 输出光谱还有一点值得注意,输出的不同频率光分量均功率较低,这是由于光谱仪在使用时对输入功率有一定的要求,为了更好的保护仪器,我们对进入光谱仪之前的光均让其先通过一个可调衰减器,因此测量显示的功率普遍低于实际对应值.

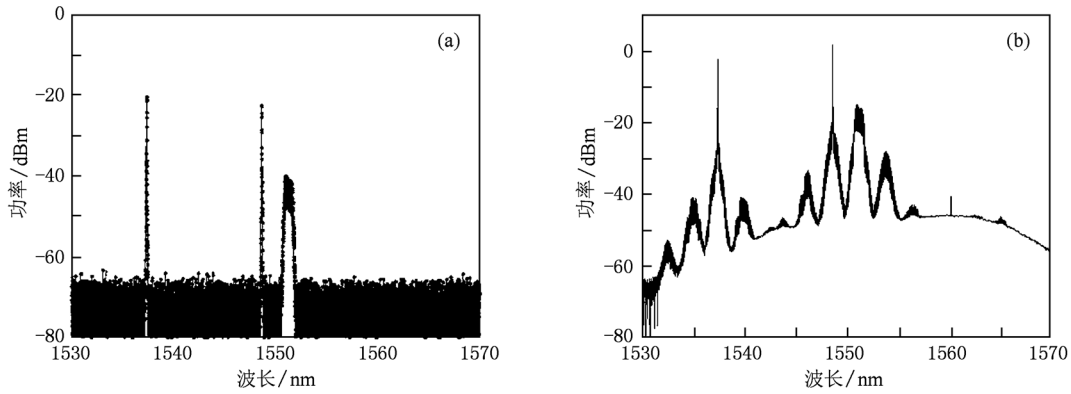


图 4 基于光子晶体光纤中多四波混频效应实现全光组播的光谱特征:光子晶体光纤(a)输入端和(b)输出端的光谱

为了进一步证明闲频光上是否携带了信号光的信息,即我们的实验装置是否实现了全光组播功能,需要用示波器测量闲频光的时域特性,我们使用滤波器 2(对应图 3 实验装置中的滤波器 2)将离散的各边带分量依次滤出,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 0.38 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,得到的眼图如图 5 所示. 从图中清晰可见,原来信号光的信息被同时复制到了四个边带上,其调制频率均为 10 Gbit/s,即实现了 4×10 Gbit/s 的全光组播功能. 值得注意的是,图 5 中,组播信号的脉冲宽度均大于原始脉冲宽度,这是由于在滤出组播信号的过程中,受实验条件所限,我们使用了带宽 0.38 nm 的 Santec 滤波器,所用滤波器较窄的带宽导致时域脉冲加宽,但这并未影

响组播效果.

4. 分析与讨论

4.1. 波长调谐性

在未来的透明光子网络中,为了充分利用网络资源,需要具备组播功能的器件尽可能在较宽的范围内实现波长可调谐,目前已有的基于传统色散位移光纤中四波混频效应的组播方案,抽运光需要设置在光纤的零色散波长附近,不具备波长灵活性,不能满足 WDM 网络需求,但在我们的光层组播方案中,我们采用具有色散平坦特性的新型高非线性光子晶体光纤,可以通过改变连续抽运光的波长来实现组播信号的调谐. 实验中,我们选取两束连续光的中心波长分别处在不同位置,使各组播信号的

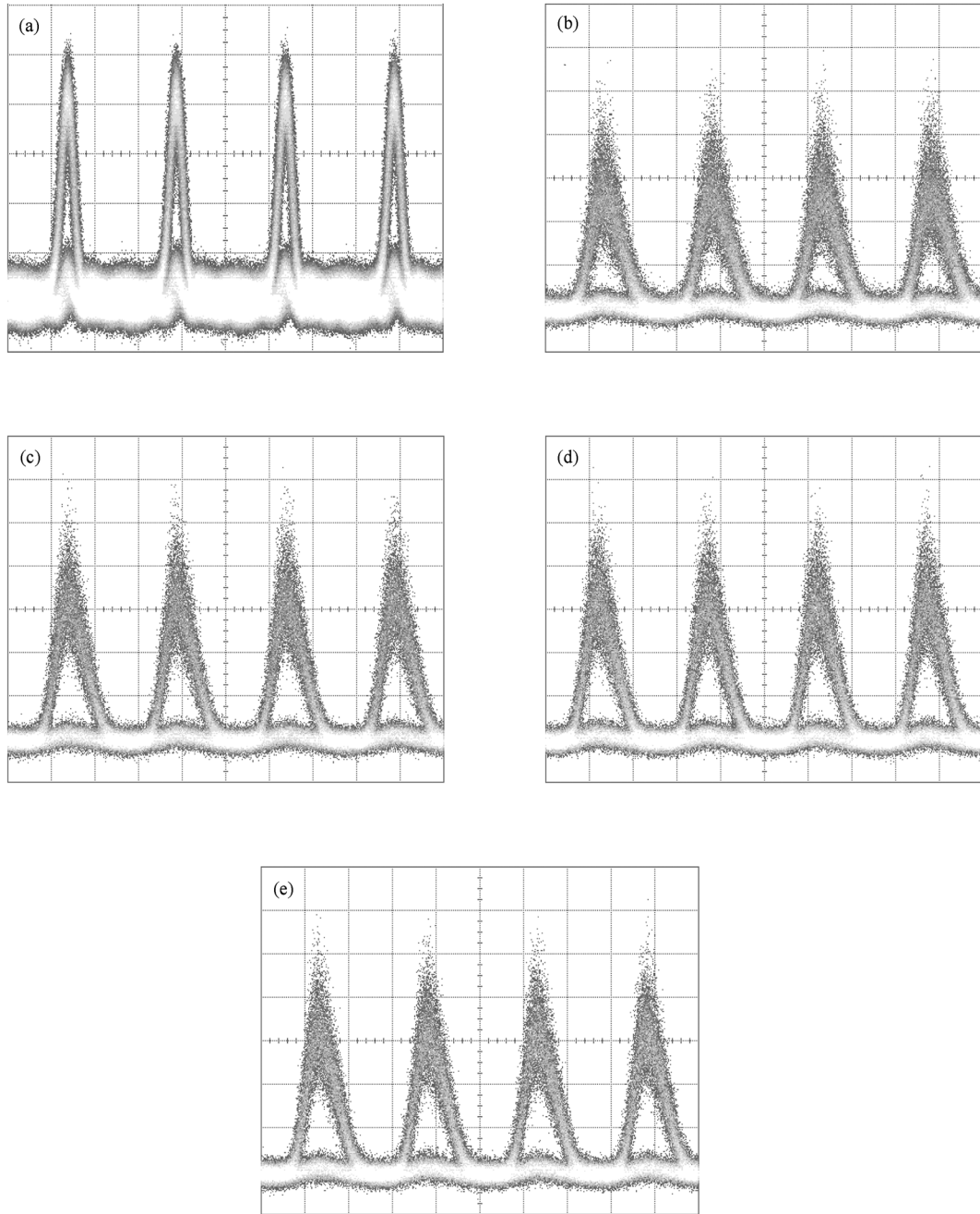


图5 基于光子晶体光纤中多抽运四波混频效应的全光组播眼图 (a)原始信号光眼图, (b)一(e)组播信号眼图

信道间距为 400 GHz, 观察不同信道间距下该装置的组播功能. 实验结果证明, 在光子晶体光纤中同样实现了多抽运四波混频效应, 对应的光谱分别如图 6(a), (b) 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多抽运四波混频效应后的输出光谱 (分别对应实验装置图中的 C 和 D 点). 结果表明, 在进入光子晶体光纤之前只有信号光和两束连续抽运光, 而经过多抽运四波混频效应, 在输出端抽运光两侧均

出现边带, 边带所出现的位置与对应抽运光之间的波长间距为 400 GHz, 这与图 1 理论分析完全符合, 进一步分别将各边带 (即四波混频产生的闲频光波) 滤出, 经光电转换后用示波器进行时域测量, 眼图显示实现了组播功能. 实际中, 由于我们的高功率掺铒光纤放大器工作波长范围有限, 所以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滤波器, 则我们的组播信号波长还可进一步拓展.

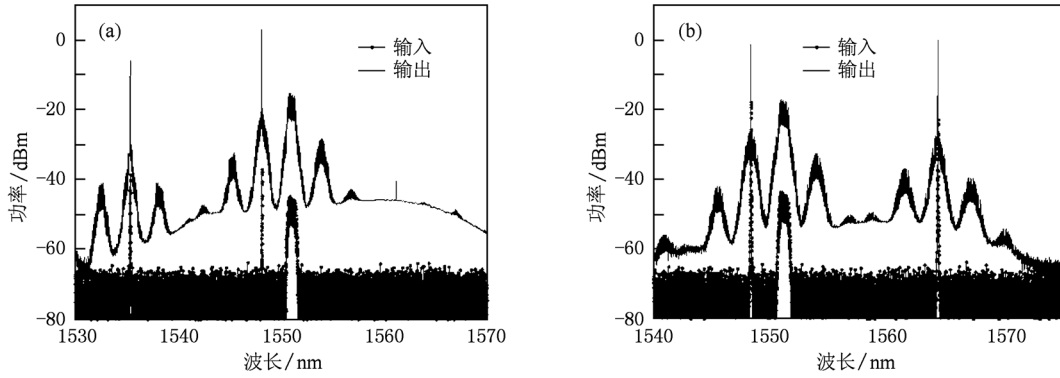


图6 基于光子晶体光纤中多抽运四波混频效应在不同信道间隔下实现全光组播的光谱特征 (a) $\lambda_{cw1} = 1535.8 \text{ nm}$, $\lambda_{cw2} = 1548.6 \text{ nm}$; (b) $\lambda_{cw1} = 1548.6 \text{ nm}$, $\lambda_{cw2} = 1564.6 \text{ nm}$

4.2. 组播效率

对于以四波混频波长转换理论为基础的全光组播技术来讲,组播效率是衡量组播系统组播能力强弱的一个重要因素,它定义为转换光功率(即分配到各组播信道光功率)与输入信号光功率之比^[27]

$$\eta = 10 \cdot \log\left(\frac{P_c}{P_s}\right), \quad (7)$$

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.

$$P_c = \left(\frac{1024\pi^6}{n^4\lambda^2c^2}\right) \cdot \left(\frac{3\chi_{1111}}{A_{\text{eff}}}\right)^2 \cdot L_{\text{eff}} \cdot P_p^2 P_s \times \exp(-\alpha L) \cdot \zeta, \quad (8)$$

其中, $\left(\frac{1024\pi^6}{n^4\lambda^2c^2}\right) \cdot \left(\frac{3\chi_{1111}}{A_{\text{eff}}}\right)^2 = \gamma$, 是非线性系数, $L_{\text{eff}} = \frac{1 - e^{-\alpha L}}{\alpha}$, 代表有效相互作用长度, $\zeta =$

$\frac{\alpha^2}{\alpha^2 + \Delta\beta^2} \left(1 + \frac{4e^{-\alpha L}}{(1 - e^{-\alpha L})} \sin^2\left(\Delta\beta \frac{L}{2}\right)\right)$, 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(8)代入(7), 可得组播效率, 但对于我们的组播系统, 信号光同时转换到了多个波长上, 进而实现了组播功能, 因此, 对每路信号, 需要分别分析其组播效率. 实验中设置信号光波长在 1551.8 nm, 抽运光波长分别为 1548.6 和 1535.8 nm, 信号光功率为 15 dBm 固定不变, 测量中逐渐增加抽运功率, 测得转换效率与抽运功率的关系如图 7(a). 由图可见, 随着抽运功率增大, 转换效率不断增长, 最后增幅趋于平缓. 增长的原因可归结于较强的抽运光功率导致光纤内发生强烈的三阶非线性极化, 形成较强的动态折射率光栅, 进而导致较强的四波混频效应发生. 而随着抽运功率继续增大, 达到光纤的受激布里渊散射阈值, 发生受激布里渊散射, 后向散射光消耗了抽运能量, 使得四波混频转换效率趋于平坦.

4.3. 组播信号 Q 因子

组播信号的质量是衡量全光组播技术性能的

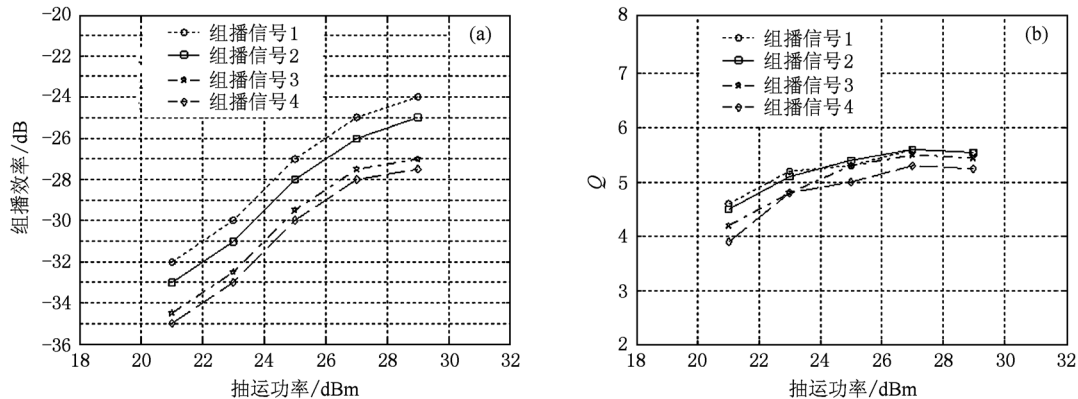


图7 (a) 组播效率随抽运功率的变化关系; (b) Q 因子随抽运功率的变化关系

重要参数,由于我们的组播方案依赖于光纤中的多抽运四波混频效应工作,往往需要相对较强的抽运功率,然而,同时出现的其他非线性效应对系统性能会产生不可避免的影响,为了表征我们设计的组播方案性能优劣,进而探究不同条件下非线性效应对组播性能的影响,我们引入 Q 因子来衡量组播信号的性能^[28]. Q 因子能够反映信号的噪声特性,其定义为

$$Q = \frac{\mu_1 - \mu_0}{\sigma_1 - \sigma_0}, \quad (9)$$

其中, μ_1 和 μ_0 分别为“1”和“0”时脉冲幅度的平均电平值, σ_1 和 σ_0 为“1”和“0”信号的高斯噪声标准偏差, Q 因子与误码率紧密相关,能够准确表征组播信号的整体性能. 实验中测得各组播信号的 Q 因子随抽运功率的变化如图 7(b). 由图可知,在大部分抽运功率范围内,组播信号的 Q 因子均大于 4,其中,最佳的 Q 因子为 5.3,这表明全光组播系统在实现组播的同时,各组播信号具有良好的信号质量.

5. 结 论

本文基于 100 米色散平坦高非线性光子晶体光纤中多抽运四波混频效应,实现了 4×10 Gbit/s 全光组播,对于该方案首先建立基于耦合波方程的理论模型,并进行数值仿真,研究了组播信号的时域特性,进而从实验上验证了系统性能. 实验中获得 35.2 nm 波长范围内组播信号的宽带可调谐,组播信道总间距 4.4 THz,组播信道的最大转换效率 -22 dB,最优 Q 因子为 5.3. 整个系统基于光子晶体光纤中的三阶非线性极化机理工作,具有噪声低,响应时间快,对调制格式和比特率完全透明等优点,同时,由于光子晶体光纤特殊的色散平坦性,既避免了使用传统光纤波长不灵活的弊端,又具有信道扩展能力,理论仿真与实验结果符合,这些研究对于促进未来透明光子网络的深入发展具有重要意义.

- [1] Pankaj R K 1999 *IEEE/ACM Trans. Netw.* **7** 414
- [2] Wang W, Rau L G, Blumenthal D J 2005 *IEEE J. Lightw. Technol.* **23** 211
- [3] George J, Rouskas N 2003 *IEEE Network* **17** 60
- [4] Hideaki Furukawa, Ampalavanapillai 2007 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **19** 384
- [5] Xu L, Chi N, Yvind K 2004 *Opt. Express* **12** 416
- [6] YAN W Z, Wang Z Y 2007 *Chin. J. of Elec.* **16** 363
- [7] Contestabile G, Calabretta N 2006 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **18** 181
- [8] Yan N, Silveira T, Teixeira A 2007 *IEEE Elec. Lett.* **43** 1731
- [9] Contestabile G, Calabretta N, Presi M 2005 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **17** 2652
- [10] Wang Y, Yu C, Luo T, Yan L, Pan Z 2005 *IEEE J. Lightw. Technol.* **23** 3331
- [11] Preetpaul Devgan, Renyong Tang, Grigoryan V S 2005 *Conference on Lasers & Electro-Optics (CLEO)* p291
- [12] Miao X R, Gao S M, Gao Y 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 7699 (in Chinese) [苗向蕊、高士明、高莹 2008 物理学报 **57** 7699]
- [13] Karasek M, Kanka J, Honzatko P, Vojtech J 2006 *Proc. ICTON* Tu. D1. 7 p155
- [14] Kwan Lau, Wang S H, Xu L X 2008 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **20** 1730
- [15] Kwok C H, Lee S H, Chow K K 2006 *OSA/CLEO CTuD4* p1
- [16] Fok M P 2007 *IEEE. Photon. Technol. Lett.* **19** 1166
- [17] Arismar Cerqueira S Jr, Chavez J M Boggio 2007 *Proceedings of IEEE IMOC* p 155
- [18] Inoue K, Hasegawa T, Oda K, Toba H 1993 *IEEE. Elec. Lett.* **29** 1708
- [19] Brès C S, Wiberg A O J 2009 *IEEE. Photon. Technol. Lett.* **21** 1002
- [20] Petropoulos P, Monro T M, Belardi W, Frusawa K 2001 *Opt. Lett.* **26** 1233
- [21] Jiang L H, Hou L T, 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 1095 (in Chinese) [姜凌红、侯蓝田 2010 物理学报 **59** 1095]
- [22] Thompson J R, Roy R 1991 *Phys. Rev. A* **43** 4987
- [23] Milton M J T 1992 *IEEE J. Quantum Electron.* **28** 739
- [24] Liu X, Zhang H, Zhang M 2002 *Opt. Express* **10** 83
- [25] Liu X M 2008 *Phys. Rev. A* **77** 043818
- [26] Liu X M, Zhou X Q, Lu C 2005 *Phys. Rev. A* **72** 013811
- [27] Batagelj B 2000 *In Proceedings of ICTON'2000* We. B. 2 p179
- [28] Mikroulis S, Bogris A, Roditi E 2004 *IEEE J Lightw. Tech.* **22** 2743

All-optical multicasting based on multi-pump four-wave mixing in photonic crystal fiber*

Hui Zhan-Qiang¹⁾²⁾ Zhang Jian-Guo^{1)†}

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

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

(Received 13 August 2010; revised manuscript received 9 September 2010)

Abstract

All-optical multicasting is a key technology of future transparent photonic network, and in this paper it is presented and experimentally demonstrated based on four-wave mixing (FWM) with multi-frequency pump in 100 m dispersion flattened highly nonlinear photon crystal fiber (HNL-PCF). A signal together with double orthogonal pumps is input into the PCF, and four idlers at new frequencies can be generated through degenerate multi-frequency pump FWM processes, which carry the same data information as the input signal and then a 4×10 Gbit/s wavelength multicasting has been obtained with a tunable operation wavelength range of 35.2 nm and total channel span of 4.4 THz. The optimal conversion efficiency and the optimal Q factor are -22 dB and 5.3, respectively. The system is transparent to both bit rate and modulation format. The advantage of this scheme consists in the ability of bandwidth, and the multicasting channel scalable due to dispersion flattening of PCF is used. Furthermore, it is all optical fiber, compact and robust, which makes it more competitive as well as easily accessible for the uses in practical optical communication systems.

Keywords: all-optical multicasting, multi-pump four-wave mixing (MP-FWM), photonic crystal fiber (PCF)

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

* Project supported by the Knowledge Innovation Project (Grant No. KGCX2-YW-108) and "Hundred Talents Program" Project of Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics of the Chinese Academy of Sciences

† Corresponding author. E-mail: zqhui@opt.ac.cn