

文章编号: 0253-2239(2010)02-0330-05

利用单个半导体光放大器实现两个独立信号同时 波长变换的实验研究

韩丙辰^{1,2} 于晋龙¹ 张立台¹ 王文睿¹ 吴波¹ 罗俊¹ 杨恩泽¹

(¹ 天津大学电子信息工程学院, 天津 300072; ² 山西大同大学物理与电子科学学院, 山西 大同 037009)

摘要 基于单个半导体光放大器(SOA),实现了两路独立信号(10 Gb/s)的同时波长变换。其中输入信号为消光比恶化的归零码,其“0”码具有较弱的光功率,并且偏振态与“1”码正交。利用 SOA 中四波混频(FWM)的强度与偏振相关特性,通过调节两路输入信号间的偏振角度,将两路信号的调制信息分别复制到了由四波混频产生的两路闲频光上。实验结果表明,输出的两路波长变换后的信号具有良好的消光比。

关键词 光通信;半导体光放大器;四波混频;波长变换

中图分类号 TN929.11 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103002.0330

Experimental Research of Simultaneously Wavelength Conversions with Two Independent Signals Based on a Single Semiconductor Optical Amplifier

Han Bingchen^{1,2} Yu Jinlong¹ Zhang Litai¹ Wang Wenrui¹ Wu Bo¹
Luo Jun¹ Yang Enze¹

(¹ School of Electronic Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

(² School of Physics and Electronic Science, Shanxi Datong University, Datong, Shanxi 037009, China)

Abstract Based on a single semiconductor optical amplifier (SOA), simultaneously wavelength conversions (WC) of two input data signals are accomplished. The input signals are return to zero (RZ) code with extinction ratio deterioration, the “0” code with lower optical power (not zero), and its polarization state is orthogonal with “1” code. Using the intensity and polarization correlation characteristic of four-wave mixing on SOA, by carefully setting the polarization relationship between one signal and the other, the two modulation signals information are copied to separately the idler of four-wave mixing (FWM). The experimental results show that the output of two-way signal with wavelengths converted has a good extinction ratio (ER).

Key words optical communication; semiconductor optical amplifier (SOA); four-wave mixing (FWM); wavelength conversion

1 引 言

全光波长变换(OWC)是波分复用(WDM)光网络中提供波长路由和波长再利用的关键技术^[1]。它利用有限的波长资源,支持不同波长之间的连接,提

高了网络的灵活性和效率。因此,随着 WDM 全光网的发展,波长变换技术越来越受到人们的关注。其中采用半导体光放大器(SOA)实现的全光波长变换(AOWC)技术具有体积小、易于集成、器件较

收稿日期: 2009-03-06; 收到修改稿日期: 2009-06-18

基金项目: 国家自然科学基金(60736035)、国家 863 计划(2007AA01Z272)新世纪优秀人才支持计划(NCET-06-0248)和山西大同大学青年项目(2008Q10)资助课题。

作者简介: 韩丙辰(1976—),男,博士研究生,主要从事高速光纤通信方面的研究。E-mail: han_bchen@126.com

导师简介: 于晋龙(1969—),男,教授,博士生导师,主要从事高速光纤通信系统、光微波和光纤传感等方面研究。

E-mail: yujinlong@tju.edu.cn

为成熟、可靠性好等优点,成为目前全光波长变换的主流技术之一^[1~6]。

目前,国内外已经报道了许多基于 SOA 的全光波长变换方案,例如:利用光带通滤波器辅助实现 320 Gb/s 的无误码的 AOWC^[2];利用级联 SOA 结构使变换范围达到 290 nm^[3];利用多抽运实现多波长输出^[4,5];利用 SOA 和光滤波器实现正码波长变换^[6];利用双半导体光放大器串联增大非线性性能^[7],利用 SOA 实现逻辑门^[8]等。但是,就目前所有的基于单个 SOA 的波长变换方案而言,其输入的编码信号只能为一,即只能实现“单路输入单路输出”或者“单路输入多路输出”。当有两路独立的编码信号同时输入一个 SOA 时,由于 SOA 中的非线性作用,如交叉增益调制(XGM)、交叉相位调制(XPM)、非线性偏振旋转(NPS)等效应,两路输入信号之间会不可避免的发生相互作用,此时,基于 SOA 的波长变换方案可以实现两路信号之间的逻辑运算^[9,10]。但是,正是由于 SOA 非线性导致的信号间的相互作用,使得人们很难利用单个 SOA 实现两路信号同时波长变换,因此,基于单个 SOA 的“两路输入两路输出”的 AOWC 方案还从未见报道。

本文提出了一种基于单个 SOA 的“两路输入两路输出”的 AOWC 方案。该方案通过使用消光比(ER)恶化的归零码作为输入信号(编码信息经幅度和偏振调制),利用 SOA 中四波混频(FWM)的幅度与偏振相关特性,将两路独立的输入信号所携带的编码信息分别复制到了 FWM 产生的不同的闲频光波长上,从而利用单个 SOA 实现了“两入两出”的 AOWC。

2 工作原理

对于 SOA 中 FWM 的经典解释为,当抽运光(λ_P)和信号光(λ_S)同时进入 SOA 时,增益介质中的载流子会形成一个与入射光强分布有关的载流子光栅。由于载流子光栅的作用,抽运光被光栅散射后产生波长为 $\lambda_{F1} = \lambda_P + \Delta\lambda$ 的转换光,信号光被光栅散射后形成波长为 $\lambda_{F2} = \lambda_S - \Delta\lambda$ 的伴随光,其中 $\Delta\lambda = \lambda_P - \lambda_S$ 。SOA 中至少有三种机制对形成载流子光栅有贡献:载流子浓度脉动(CDP, Carrier Density Pulsation)、动态载流子加热效应(CH, Carrier Heating)和频谱烧孔(SHB, Spectral-Hole Burning)。这些机制具有不同的载流子生存周期和散射长度,SOA 中的 FWM 是这三种机制共同作用

的结果。在实验论证时,多采用抽运光为连续光,而探测光为编码信号,并且为保证 FWM 的转换效率最高,抽运光和探测光的偏振态基本为一致,闲频光处均可得到与信号相同的编码信息。

而方案中同样基于 SOA 的 FWM 效应,但使用的抽运光和探测光均为消光比恶化的归零码信号,其“0”码具有比“1”码弱的光功率(并非为零),并且“0”码的偏振态与“1”码的偏振态正交,这样导致 SOA 中 FWM 的结果将明显不同于常规的结果。理论上,本方案中使用的信号可以由铌酸锂马赫-曾德尔电光调制器结合偏振控制器(PC)得到,如图 1 所示。

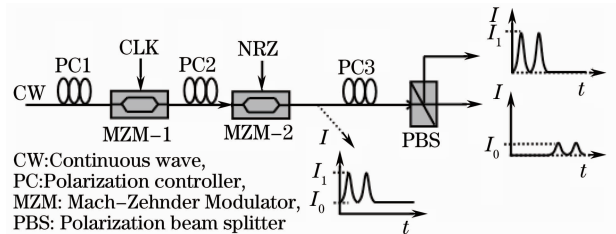


图 1 消光比恶化的 RZ 信号产生方案

Fig. 1 Generation scheme of ER-degraded RZ signals

分别调整偏振控制器 PC1 和 PC2,使输入光在 x 轴和 y 轴方向上均有分量;然后调整偏置电压功率,使 θ_x 为 π ,此时由于铌酸锂晶体的两个透光轴的电光系数不同, θ_y 不等于 π ;最后保持偏置电压不变,调整调制信号的驱动电压,可以使 θ_y 为 π ,而 θ_x 不等于 π 。其中 x 轴、 y 轴代表铌酸锂晶体的两个透光轴(快、慢轴),其偏振方向互相垂直; θ_x 表示在调制器输出端光在两个干涉臂中的 x 轴方向上传输的相位差; θ_y 表示在调制器输出端光在两个干涉臂中的 y 轴方向上传输的相位差。这样,当调制信号为“0”码时, x 方向的光干涉相消,输出光为 y 方向的线偏振光;当调制信号为“1”码时, y 方向的光干涉相消,输出光为 x 方向的线偏振光。

将该信号经过另一个偏振控制器 PC3 输入到偏振分束器(PBS),调整 PC3,可以使 PBS 的两路输出端偏振态分别与 x 轴、 y 轴对准。此时在 PBS 两路输出端能够得到峰值功率不同、相位相反的两路信号。这样可以说明上述信号“0”码与“1”码之间的偏振态差异。

利用消光比恶化的归零码信号,提出了基于单个 SOA 的“两入两出”的两路独立信号的同时全光波长变换方案,其工作原理如图 2 所示。两路独立的归零码信号(其波长分别为 λ_A, λ_B)同时输入到一个 SOA 中,其中一路的信号偏振态由一个 PC 来调

整。在 SOA 输出端用两个光带通滤波器(OBPF)分别滤出 FWM 产生的两路闲频光(波长分别为 $\lambda_{F1}, \lambda_{F2}$)从而得到输出的两路不同编码信号。其中图 2(a)为系统结构框图,图 2(b)表明当 A^1 与 B^1 平行时,输出逻辑“与”,图 2(c)表明当 A^1 与 B^1 垂直时,输出逻辑“ $A \cdot \bar{B}$ ”和“ $\bar{A} \cdot B$ ”,图 2(d)表明“两入两出”的 AOWC,其中坐标轴 I 和 t 代表强度和时间, X 和 Y 代表偏振方向。

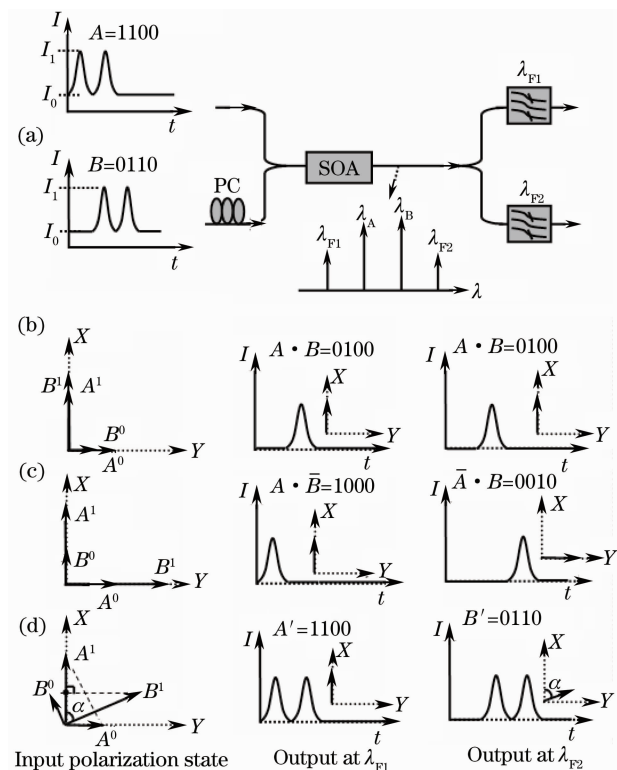


图 2 工作原理示意图

Fig. 2 Operation principle of the proposed scheme

通过对 SOA 的 FWM 效应的理论分析和实验研究,在抽运光与探测光的波长间隔不变的情况下, FWM 的转换效率主要取决于抽运光功率^[11,12]以及抽运光与探测光之间的偏振关系^[7]。基于上述特点,可以得到每个比特周期内,在波长 λ_{F1} 处,能够高效产生 FWM 的两个条件:1) 信号 A 必须具有较大的功率,以确保它能够作为抽运使 FWM 高效率地在 λ_{F1} 发生,也就是说,信号 A 必须为“1”码;2) 在同一时刻,信号 B (作为探测光)的偏振态不能与信号 A “1”码的偏振态垂直。在波长 λ_{F2} 处, FWM 产生条件与前面提到的相同,只需将信号 B 作为抽运光,信号 A 为探测光即可。基于这两个条件,调整图 2(a)所示的 PC,在波长 $\lambda_{F1}, \lambda_{F2}$ 处,可以得到 3 种不同的输出结果(在下面的分析中,用符号 A^1, A^0, B^1 和 B^0 来表示信号 A, B 的“1”码和“0”码的偏振态):

1) A^1 与 B^1 平行[如图 2(b)]:此时,只有当 A, B 同时处于“1”码时, SOA 中 FWM 可以较高效率地发生,这样在波长 $\lambda_{F1}, \lambda_{F2}$ 处将分别产生信号 A 和 B 的“与”逻辑运算结果,且输出光的偏振态分别与 A^1, B^1 相同。这种情况与通常利用 SOA 中 FWM 实现全光“与”逻辑相似^[9]。

2) A^1 与 B^1 垂直[如图 2(c)]:在波长 λ_{F1} 处,只有当 A 处于“1”码而 B 处于“0”码时, SOA 中 FWM 可以较高效率地发生。此时, A 的“1”码作为抽运光而 B 的“0”码作为探测光。因此,在波长 λ_{F1} 处将输出信号 A, B 的逻辑“ $A \cdot \bar{B}$ ”运算,并且输出光偏振态与 A^1 相同。同理,在波长 λ_{F2} 处将输出信号 A, B 的逻辑“ $\bar{A} \cdot B$ ”运算,并且输出光偏振态与 B^1 相同。

3) A^1 与 B^1 之间的偏振方向呈 α 角,且 α 既不等于 0 又不等于 90° [如图 2(d)]:这种情况下,由于 B^0 与 B^1 都不与 A^1 垂直,所以前面提到的 FWM 产生的第二个条件总是能够满足,也就是说,在波长 λ_{F1} 处, B 的“0”码和“1”码均可以作为探测光,并且 B 的“0”码和“1”码在与 A^1 方向相同的投影均相同,且投影的幅度远小于“1”码。因此,只要 A 处于“1”码, FWM 就能在波长 λ_{F1} 处产生。此时,在波长 λ_{F1} 处输出的信号与信号 A 所携带的调制信息相同。同理,在波长 λ_{F2} 处将输出与信号 B 调制信息相同的信号。这样,就实现了“两入两出”的全光波长变换。另外,通过调整 PC 可以仔细地调节 α ,使得 B 的“0”码和“1”码在 A^1 方向具有相同强度的偏振分量,这样就能够弥补信号“0”码和“1”码的强度差异。一般情况下, α 需满足

$$I_1 \cdot \cos \alpha = I_0 \cdot \sin \alpha.$$

以上为单个 SOA 中,当输入两路独立的消光比恶化的编码信号时,发生 FWM 效应的理论分析。基于该理论,以两路 10 Gb/s 的归零码信号进行了实验验证。

3 系统实验和结果

实验装置如图 3 所示。两个分布反馈(DFB)激光器 LD-1, LD-2 产生两路波长分别为 1550.9 nm (λ_A)和 1551.7 nm (λ_B)的连续光。利用两个铌酸锂马赫-曾德尔调制器(MZM)先后将 10 GHz 的电时钟信号以及 10 Gb/s 的伪随机非归零信号调制到两路连续光上,得到具有相同编码信息的路两路归零码光信号。其中,通过调整两个调制器的偏置电压、调制电压以及偏振控制器(PC-1, PC-2, PC-3),得到如前文所述的消光比恶化的 RZ 信号。将这两路信号用波分

解复用器(WDM)分开,并将其中一路信号用光延时线(ODL)延时几个比特周期,以得到两路编码信息不同的信号,其中信号 A 为“0111001”、信号 B 为“1100101”[如图 4(a)、图 4(b)所示]。两路不同的编码信号进入 SOA,在 SOA 中发生 FWM 效应,通过两个光带通滤波器 OBPF-1 和 OBPF-2 分别滤出两路闲频光信号,即可得到前面提到的全光逻辑运算结果和两路光信号的同时波长变换。实验中,在输入 SOA 之前,测得的信号 A,B 的平均功率分别为 3.4 dBm 和 3.5 dBm,而两路信号的消光比均为 4.8 dB。

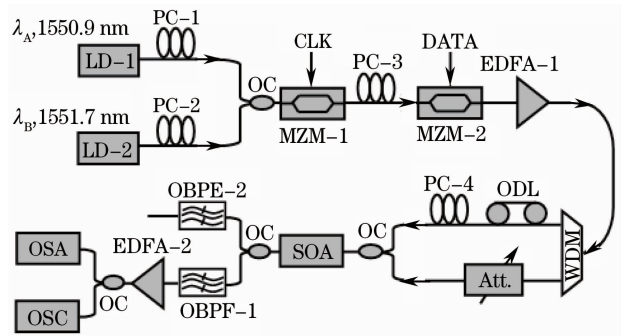


图 3 系统实验装置

Fig. 3 Experimental setup of the system

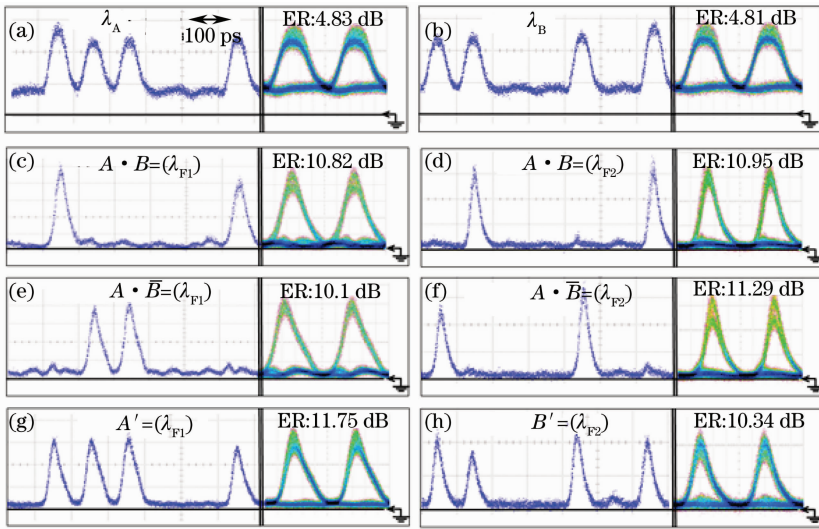


图 4 实验结果, (a)(b)为输入信号波形, (c)~(h)为输出波形

Fig. 4 Waveforms of the (a) (b) input and (c)~(h) output signals of the proposed scheme

本实验所采用的 SOA(CIP, SOA-NL-OEC-1550, 偏振相关增益为 0.5 dB)偏置电流为 300 mA。在 SOA 输出端,测得的 FWM 的光谱如图 5 所示,由 FWM 产生的两路闲频光波长分别为 1550.1 nm(λ_{F1}) 和 1552.5 nm(λ_{F2})。

在 SOA 输出端所采用的光带通滤波器(OBPF)3 dB 带宽为 0.26 nm,通过调整 PC-4,可以

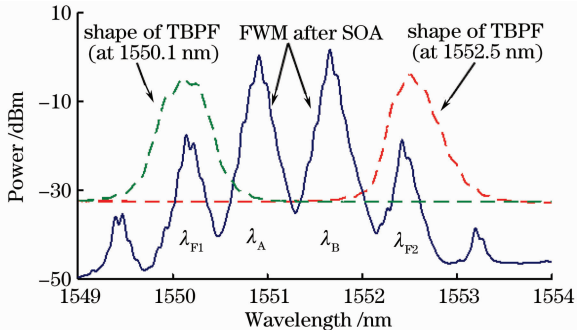


图 5 在 SOA 输出端测得的 FWM 频谱图以及滤波器的位置

Fig. 5 Measured spectrum of FWM at SOA output

在波长 λ_{F1} (或 λ_{F2}) 处得到两路输入信号的“与”逻辑、“A · B” (“ $\bar{A} \cdot \bar{B}$ ”) 逻辑以及“两入两出”全光波长变换,其实验结果如图 4(c)至图 4(h)所示,并且所有的变换后信号的消光比均大于 10 dB。

4 结 论

利用半导体光放大器中四波混频效应的功率与偏振相关特性,提出了一种基于单个半导体光放大器的“两入两出”的全光波长变换方案,实现两个独立信号同时波长变换,并以 10 Gb/s 归零码数据信号实验论证了方案的可行性。基于 SOA 的 FWM 的特性可知,本方案能够在 40 Gb/s 的速率下工作。

参 考 文 献

- 1 Terji Durhuus, Benny Mikkelsen, Carsten Joergensen *et al.*. All-optical wavelength conversion by semiconductor optical amplifiers [J]. *J. Lightw. Technol.*, 1996, **14**(6): 942~954
- 2 Y. Liu, E. Tangdiongga, Z. Li *et al.*. Error-Free 320 Gbs all-optical wavelength conversion using a single semiconductor optical amplifier[J]. *J. Lightw. Technol.*, 2007, **25**(1): 103~108

- 3 Motoharu Matsuura, Naoto Kishi, Tetsuya Miki. All-optical wavelength conversion with large wavelength hopping by utilizing multistage cascaded SOA-based wavelength converters[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2006, **18**(8): 926~928
- 4 Yan, Ni, Monroy, Idelfonso Tafur *et al.*. Optical multicast technologies by multi-wavelength conversion for optical routers [C]. *Communication Technology*, 2006, ICCT'06, **10**: 1~4
- 5 G. Contestabile, M. Presi, E. Ciaramella. Multiple wavelength conversion for WDM multicasting by FWM in an SOA[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2004, **16**(7): 1775~1777
- 6 Zhang Aixu, Yu Jinlong, Wang Yaotian *et al.*. Noninverted wavelength conversion for 40 Gb/s return-to-zero signal based on semiconductor optical amplifier and optical bandpass filter[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(2): 249~254
张爱旭,于晋龙,王耀天等. 基于半导体光放大器和整形滤波器的 40 Gb/s 的归零正码波长变换研究[J]. *光学学报*, 2008, **28**(2): 249~254
- 7 Yu Yinlong, Wang Yaotian, Zhang Aixu *et al.*. Experimental study on 40 Gb/s all optical 3R regeneration [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(5): 801~806
于晋龙,王耀天,张爱旭等. 40 Gbit/s 信号全光 3R 再生实验[J]. *光学学报*, 2007, **27**(5): 801~806
- 8 Han Bingchen, Yu Jinlong, Zhang Litai *et al.*. Reconfigurable all-optical logic gates with not-inverted data technique by using a single semiconductor optical amplifier [J]. *Chinese J. Laser*, 2009, **36**(9): 2367~2371
韩丙辰,于晋龙,张立台等. 利用单个半导体光放大器实现非反转 RZ 码的可重构全光逻辑门[J]. *中国激光*, 2009, **36**(9): 2367~2371
- 9 L. Zhihong, L. Guifang. Ultrahigh-speed reconfigurable logic gates based on four-wave mixing in a semiconductor optical amplifier[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2006, **18**(12): 1341~1343
- 10 J. Dong, X. Zhang, Y. Wang, *et al.*. 40 Gbit/s reconfigurable photonic logic gates based on various nonlinearities in single SOA [J]. *Electron. Lett.*, 2007, **43**(16): 884~886
- 11 Ding Yuan, Zhang Xinliang, Dong Jianji *et al.*. Improvement for all-optical logical AND gate based on cascaded semiconductor optical amplifiers [J]. *Chinese J. Laser*, 2007, **34**(11): 1517~1521
丁园,张新亮,董建绩等. 基于级联半导体光放大器实现全光逻辑与门的改进方案[J]. *中国激光*, 2007, **34**(11): 1517~1521
- 12 A. D' Ottavi, E. Iannone, A. Mecozzi *et al.*. Efficiency and noise performance of wavelength converters based on FWM in semiconductor optical amplifiers [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1995, **7**(4): 357~359