

文章编号: 0253-2239(2008)07-1327-06

基于半导体光放大器四波混频效应的多种调制格式的 波长转换实验

董建绩 张新亮 黄德修

(华中科技大学 光电子科学与工程学院 武汉光电国家实验室, 湖北 武汉 430074)

摘要 实验报道了利用半导体光放大器(SOA)的四波混频(FWM)效应实现多种码型的波长转换,其中对于非归零(NRZ)信号实现了从单信道到三信道的多波长转换,调制速率从 10 Gb/s 到 40 Gb/s 均实现多波长转换。对于归零(RZ)信号分别实现了 20 Gb/s 和 40 Gb/s 的 RZ 格式的波长转换和 40 Gb/s 的载波抑制归零(CSRZ)格式的波长转换,利用光纤布拉格光栅(FBG)作为带陷滤波器消除共轭光和抽运光之间的串扰。对于非归零差分相移键控(NRZ-DPSK)信号分别实现了 20 Gb/s 和 40 Gb/s 的波长转换,利用实验室自制的光纤延时干涉仪进行 NRZ-DPSK 信号的解调。基于 FWM 效应的转换光的输出消光比大于 7 dB,转换后消光比退化约为 3 dB。

关键词 半导体光放大器; 四波混频; 波长转换; 多点传送

中图分类号 TN929.11 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20082807.1327

Experimental Study of Wavelength Conversion at Various Modulation Formats Based on Four-Wave Mixing in a Semiconductor Optical Amplifier

Dong Jianji Zhang Xinliang Huang Dexiu

(Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, School of Optoelectronic Science and Technology,
Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China)

Abstract The wavelength conversion based on four-wave mixing (FWM) in semiconductor optical amplifier (SOA) for a variety of modulation formats is demonstrated. As for nonreturn-to-zero (NRZ) format, the single-to-triple channel wavelength conversion is reported. The modulation speed varies from 10 Gb/s to 40 Gb/s. As for return-to-zero (RZ) format, the wavelength conversion at 20 Gb/s and 40 Gb/s is realized. As for carrier suppressed RZ (CSRZ) format, the 40 Gb/s wavelength conversion is achieved. A notch filter made by fiber Bragg grating is used to separate the conjugated light and the pump light. As for NRZ-differential phase shift keying (DPSK) format, the wavelength conversion at 20 Gb/s and 40 Gb/s is realized. A home-made fiber delayed interferometer (FDI) is employed to demodulate the converted DPSK signal. The output extinction ratio (ER) of the converted signal based on FWM is higher than 7 dB, and the ER degradation is about 3 dB.

Key words semiconductor optical amplifier; four-wave mixing; wavelength conversion; multicasting

1 引 言

基于四波混频(FWM)的全光波长转换技术是未来多波长通信系统的核心技术之一。与其他转

换技术相比,四波混频具有比特率透明性、调制格式透明性和多波长同时转换的能力等优势,从而在未来全光通信系统中有巨大的应用潜力。能够产生

收稿日期: 2007-11-12; 收到修改稿日期: 2007-12-13

基金项目: 国家 863 计划(2006AA03Z0414)、国家自然科学基金(60577007)、湖北省杰出青年人才基金(2006ABB017)和教育部新世纪优秀支持人才计划(NCET-04-0715)资助课题。

作者简介: 董建绩(1979—),男,博士研究生,主要从事光通信器件、高速全光信号处理(全光波长转换、码型转换、全光逻辑)等方面的研究。E-mail: jidong@mail.hust.edu.cn

导师简介: 张新亮(1971—),男,教授,博士生导师,主要从事基于半导体光放大器的全光信号处理和微波光子学等方面的研究。E-mail: xlzhang@mail.hust.edu.cn

FWM 的非线性介质有很多种,如分布反馈半导体激光器^[1]、半导体光放大器(SOA)^[2]、光子晶体光纤^[3]和高非线性光纤^[4]等。而 SOA 具有较高的非线性,较小的体积,容易集成和低功耗等优点仍然受到广泛的关注^[2,5~11]。

在全光网络中,各种码型的产生方法^[12,13]及其传输特性^[14]的报道层出不穷,这些码型在全光网络将有着各自的用途,而利用 SOA 的 FWM 效应可以实现任意调制码型的波长转换,本文从实验上研究了各种调制码型的波长转换特性,包括非归零码(NRZ)、归零码(RZ)信号、载波抑制归零码(CSRZ)和非归零差分相移键控(NRZ-DPSK)信号。其中对于 NRZ 信号实现了从单信道到三信道的多波长转换。

2 不同调制格式的波长转换

利用 SOA 的 FWM 效应实现波长转换的基本原理可简述如下。在 SOA 的输入端同时注入光频为 ω_1 的连续抽运光和光频为 ω_2 载有信号的信号光。这两种光在半导体有源光波导内受到超快的三阶非线性效应的影响,拍频形成增益和相位光栅,对输入信号光场散射后产生频率为 $\omega_c = 2\omega_1 - \omega_2$ 的共轭光信号及频率为 $\omega_s = 2\omega_2 - \omega_1$ 的卫星光信号。此时的非线性过程称为简并的四波混频。共轭光的输出光场可以表示为

$$E_c = (A_1 A_2) r(\omega_1 - \omega_2) A_1 \times \exp[j(2\omega_1 - \omega_2)t + (2\phi_1 - \phi_2)], \quad (1)$$

其中 A_i 、 ω_i 和 ϕ_i 分别表示信号光 i 的光场、频率和相位, $r(\omega_1 - \omega_2)$ 表示转换效率。

从(1)式可以看出,输出的共轭光复制了信号光的信息,包括强度信息和相位信息,所以利用 SOA 的 FWM 效应实现波长转换具有调制格式透明的优点。另外该方案的波长转换还具有比特率透明的优点。

实验装置如图 1 所示,连续的抽运光由激光器 LD2 产生,输出波长为 1557.3 nm。信号光由激光器 LD1 产生,波长为 1559 nm,信号光经过两个级联的马赫-曾德尔调制器(MZM)调制后得到所需格式的数据信号,调制格式可以是 NRZ、RZ 以及对应的差分相移键控(DPSK)信号,其中数据信号是通过码型发生器(BPG)加载的,并且调制速率可以实现从 2.5 Gb/s 到 40 Gb/s 连续可调,信号光经过第一个掺铒光纤放大器(EDFA1)放大后和抽运光一起耦合输入 SOA,实验中采用 Kamelian 公司的 SOA,其偏置电流为 200 mA,小信号增益为 20 dB,饱和输出功率为 10 dBm,偏振相关增益小于 1 dB。偏振控制器用来控制两路信号的偏振态以便产生最大的 FWM 效率。窄带滤波器(NBPF)用来滤出转换光波长,其 3 dB 带宽为 0.32 nm。考虑到 FWM 的转换效率不高,我们用第二个 EDFA 对输出信号光放大,最后用光谱分析仪(OSA)和通信信号分析仪(CSA)分别测量输出光的光谱和时域波形。实验中为了更好的分离转换光和信号光信道频率,在 A 点增加一个光纤布拉格光栅(FBG),其透射谱是一个带陷滤波器,可以滤除抽运光波长。对于 DPSK 信号的波长转换,在输出端需 DPSK 信号的解调装置,因此在 B 点利用自制的光纤延时干涉仪(FDI)进行解调后再用 CSA 观察波形。

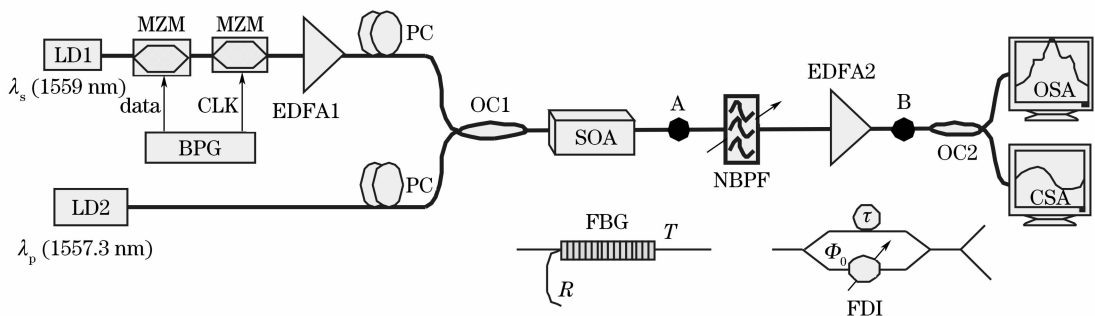


图 1 基于 SOA 的 FWM 效应的波长转换实验装置图

Fig. 1 Experimentnal setup for wavelength conversion based on FWM in SOA

既然基于 SOA 的 FWM 效应的波长转换具有比特透明和格式透明的优点,下面从实验上探讨不同调制格式、不同调制速率的波长转换,其中对于 NRZ 格式的波长转换,提出单信道到三信道的多波长转换方案,该方案可以实现波分复用(WDM)系

统中多点传送功能。

2.1 NRZ 格式的多波长转换及其在 WDM 系统中的应用

多波长转换原理如图 2 所示,当连续的抽运光 λ_p 和携带数据的信号光 λ_s 同时输入 SOA 时,由于

FWM 效应产生两路新频率的光信号,分别记为共轭光 λ_{c1} 和卫星光 λ_{c2} ,近似满足关系式 $\lambda_{c1} = 2\lambda_p - \lambda_s$ 和 $\lambda_{c2} = 2\lambda_s - \lambda_p$,这两个新频率的光信号同样携带了信号光上的信息,实现同相波长转换;而抽运光在 SOA 内受到交叉增益调制的作用,其输出携带了信号光上的信息,而极性相反,同样实现波长转换功能。因此用滤波器分别接收这三路信号,则可以实现单信

道到三信道的多波长转换,该方案可以应用于 WDM 系统中的波长多点传送。波长多点传送是网络协议的一个重要特征,它的功能是将单个数据包转换到多个波长信道上进行广播式发送。多点传送功能为大规模带宽应用如 IPTV 和电话会议提供了有效的支持。因为一个数据包可以同时传到多个用户终端,所以网络资源的使用效率得到极大的提高^[3]。

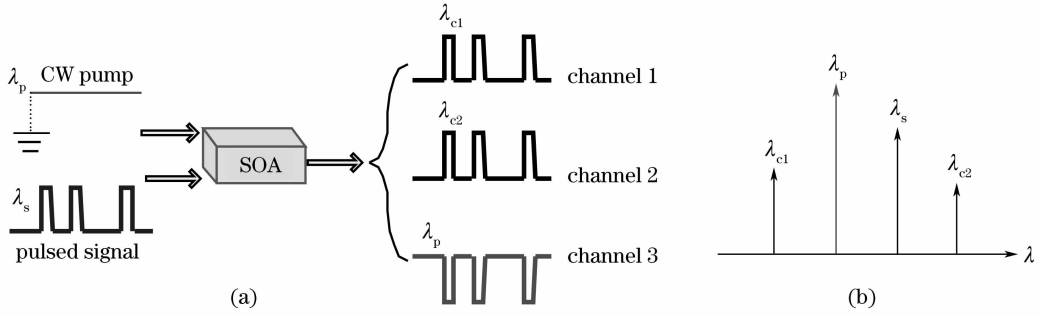


图 2 (a) NRZ 格式的多波长转换原理图, (b) SOA 中发生 FWM 的光谱图

Fig. 2 (a) Operation principle for multichannel wavelength conversion of NRZ formats, (b) spectrum of FWM in SOA

抽运光的功率设置为 7 dBm,信号光的峰值功率也设定为 7 dBm,调整两个偏振控制器,使得 SOA 输出的两个新频率光信号功率尽可能高,如图 3(a)所示。输入 SOA 之前的抽运光是连续光,所以光谱很窄,而信号光是携带数据的,光谱较宽。经过 SOA 传输之后,两路信号的光谱均有不同程度的展宽,这主要是由 SOA 内部的相位调制造成的,同时由于发生 FWM 效应,产生了两个新频率的光信号,用窄带滤波器分别滤出共轭光波长 1555.6 nm 和卫星光波长 1560.7 nm,如图 3(b)所示,即可得到同相的波长转换,转换后得到的波形分别如图 4(b)和(d)所示,测量得到输出的峰值功率约为 7 dBm,

输出消光比分别为 9.8 dB 和 9.5 dB。图 4(a)是输入的 NRZ 信号,用滤波器将抽运光滤出后得到反相的波长转换结果,如图 4(c)所示,测量得到输出的消光比为 6 dB。本方案中,抽运光的功率比信号光功率要高,所以得到的交叉增益调制深度较弱,抽运光输出的消光比不高。

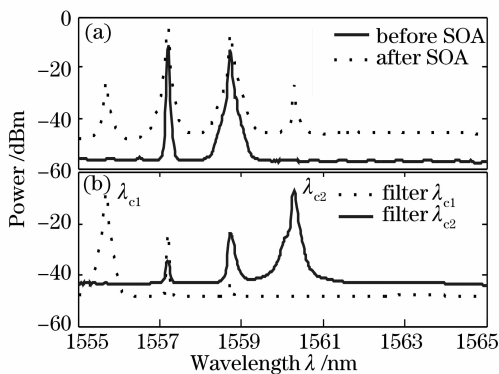


图 3 NRZ 信号的 FWM 光谱图, (a) SOA 的输入和输出光谱图, (b) 滤波器滤出共轭光和卫星光的光谱图

Fig. 3 FWM spectra of NRZ signals, (a) input and output spectra of SOA, (b) spectra of conjugated light and satellite light

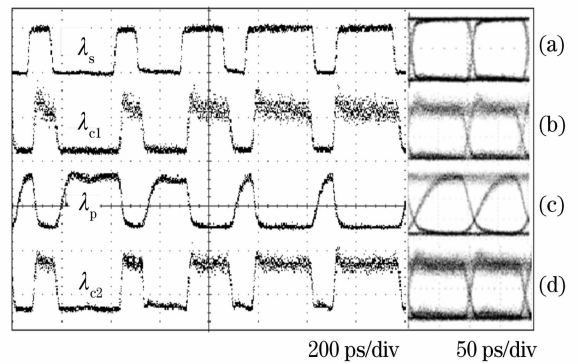


图 4 速率为 10 Gb/s 的 NRZ 信号的多波长转换结果, (a)~(d) 分别为输入的 NRZ 信号,输出的共轭光信号,输出的抽运光信号和输出的卫星光信号,左侧为波形,右侧为眼图

Fig. 4 Multichannel wavelength conversion of NRZ formats at 10 Gb/s, (a)~(d) input signal, conjugated light, output pump signal, the satellite light, respectively.

Left column: waveform, right column: eye diagram

如前面所述,FWM 效应具有比特率透明的特点,进一步将 NRZ 信号光调制速率增加到 40 Gb/s,图 5 显示的是 40 Gb/s 的 NRZ 信号的多波长转换结

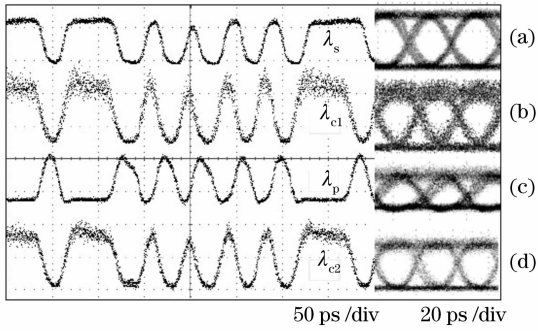


图 5 速率为 40 Gb/s 的 NRZ 信号的多波长转换结果, (a)~(d)分别为输入的 NRZ 信号,输出的共轭光信号,输出的抽运光信号和输出的卫星光信号,左侧为波形,右侧为眼图

Fig. 5 Multichannel wavelength conversion of NRZ formats at 40 Gb/s. (a)~(d) input signal, conjugated light, output pump signal the satellite light, respectively. Left column: waveform, right column: eye diagram

果,图 5(a)是输入的 NRZ 信号光,图 5(b)和图 5(d)分别是滤波器滤出共轭光和卫星光后得到的输出波形,可以看出输出信号质量较好,并无码型效应产生,不过输出的“1”信号存在一定的噪声,这主要是 SOA 和 EDFA 的自发辐射噪声共同引起的,共轭光和卫星光的输出消光比分别为 9 dB 和 8.6 dB。实验中所用 SOA 的增益恢复时间约为 60 ps,对于 40 Gb/s 的交叉增益型波长转换,该恢复时间仍然过长,为了在抽运信号上得到高质量的反相波长转换结果,采用滤波器蓝移的办法加速 SOA 的增益恢复过程,将滤波器中心波长相对于抽运光蓝移 0.2 nm 后得到输出反相波形,如图 5(c)所示,输出信号没有码型效应,不过输出消光比仍然不高,只有 5.5 dB。

2.2 RZ 格式的波长转换

RZ 格式的信号和 NRZ 格式相比,具有光谱较宽,时域脉宽较窄的特点。而为了提高 FWM 的转换效率,抽运光和信号光的波长间隔要尽可能的小,这就给滤出共轭光波长增加了一定的难度。对于 RZ 格式的波长转换,增加了一个 FBG 带陷滤波器,和窄带滤波器级联使用。图 6(a)所示为 20 Gb/s 的 RZ 信号波长转换的光谱演化过程,在输入 SOA 之前只有抽运光和信号光频率,而经过 SOA 传输后,输出的光谱包含四个频率的信号,由于简并的 FWM 效应,在抽运光的左侧产生了新频率的共轭光,在信号光的右侧产生了新频率的卫星光,由于输入的抽运光功率较大,所以先用带陷滤波器滤除抽运光波长,再用窄带滤波器滤出共轭光信号,从图 6

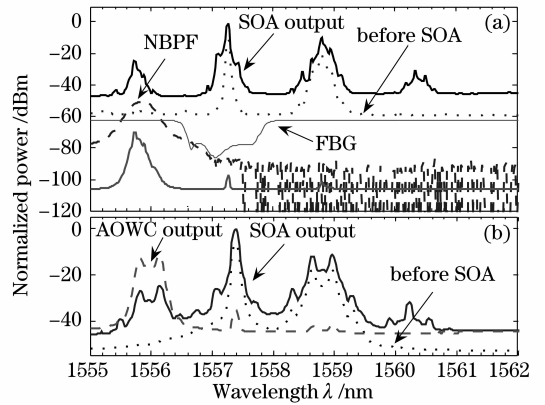


图 6 波长转换过程中的光谱演化, (a) 20 Gb/s 的 RZ 信号的波长转换, (b) 40 Gb/s 的截波抑制归零信号的波长转换

Fig. 6 Spectrum evolution in wavelength conversion, (a) wavelength conversion of RZ signal at 20 Gb/s, (b) wavelength conversion of CSRZ signal at 40 Gb/s

(a)可以看出,波长转换后的输出谱中,共轭光波长的峰值功率比抽运光要高 30 dB 以上,这样就消除了抽运光信号的串扰。图 7(a)和图 7(b)分别是对应的 20 Gb/s 波长转换的输入和输出时域波形和眼图。输出眼图质量较好,测量得到输出的消光比为 9.5 dB。调整基准脉冲发生器(BPG)的工作条件,将输入 RZ 信号的调制速率提高到 40 Gb/s,类似地,得到的输入信号光和输出共轭光波形如图 7(c)

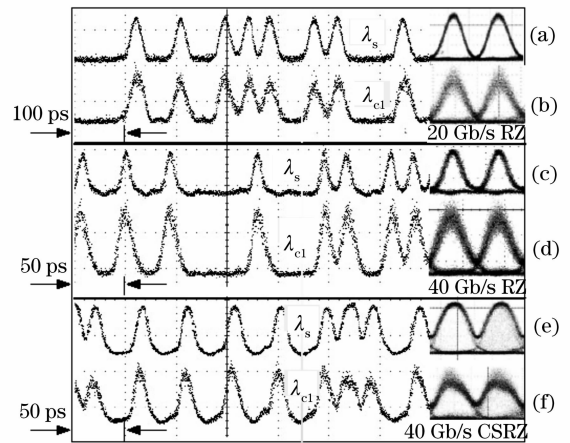


图 7 RZ 信号的波长转换结果, (a)和(b)分别是 20 Gb/s 的 RZ 信号及其转换光, (c)和(d)分别是 40 Gb/s 的 RZ 信号及其转换光, (e)和(f)分别是 40 Gb/s 的 CSRZ 信号及其转换光。左侧为波形,右侧为眼图

Fig. 7 Wavelength conversion with RZ formats, (a), (b) RZ signal and converted signal at 20 Gb/s, (c), (d) RZ signal and converted signal at 40 Gb/s, (e), (f) CSRZ signal and converted signal at 40 Gb/s. Left column: waveform, right column: eye diagram

和图 7(d)所示,输出消光比为8.6 dB。

值得注意的是,对于 RZ 格式的信号也能实现多波长转换,其原理和 NRZ 格式的多波长转换原理类似,区别在于利用交叉增益调制效应得到的那个转换光是反相的 RZ 格式,虽然数据格式相对于输入信号发生改变,但是并不影响数据信号的电平判决。

上面提到的 RZ 信号的占空比为 33%,而占空比为 66%的 RZ 格式命名为 CSRZ 信号,其特点是相邻比特的相位差为 π ,从光谱看,光载波频率被抑制,而两个边带频率突出。图 6(b)描述了 40 Gb/s 的 CSRZ 信号在波长转换中的光谱演化过程,进入 SOA 之前只存在抽运光频率和信号光频率,而信号光谱呈现 CSRZ 光谱特性,在 SOA 的输出端,由于发生简并的 FWM 效应,在光谱左侧出现了共轭光信号,其光谱也符合 CSRZ 格式的特性。在带陷滤波器和窄带滤波器的级联滤波之后,得到转换光的 CSRZ 光谱。图 7(e)和图 7(f)分别对应输入的 CSRZ 信号波形和输出的共轭光波形,测得输出消光比为 7.2 dB。

2.3 DPSK 格式的波长转换

DPSK 信号的特点是幅度一致,编码信息在相位上,利用相邻码元的相位变化表示“0”和“1”信号。DPSK 的主要优点就是高的接收灵敏度,和开关键控(OOK)相比,DPSK 信号在得到相同的误码率的时候所需的光信噪比要少 3dB。另一个优点就是对非线性的容忍度很高,特别是在通信速率高于 20 Gb/s 的系统中。既然 DPSK 信号在全光网络里有这样独特的优势,实现 DPSK 信号的全光波长转换也是一项关键技术。

本实验利用两个级联的 MZM 调制器产生 NRZ-DPSK 信号,其特点是数据信号在 0(相位为 0)和 1(相位为 π)之间跳变的时候,会出现一个下降沿和上升沿,即一个凹陷^[15]。图 8(a)是输入的 NRZ-DPSK 信号波形,调制速率为 40 Gb/s,可以看出在信号 0 和 π 之间存在一个凹陷。输入信号的原始编码为“1100 1000 1010 1110”。经过带陷滤波器和窄带滤波器级联滤波后,得到的转换光波形如图 8(b)所示,利用 FDI 解调后在相消端输出的波形如图 8(c)所示,解调后的编码为“1010 1100 1111 1001”,输出消光比为 6.7 dB;在相涨端输出的波形如图 8(d)所示,解调后编码为“0101 0011 0000 0110”,输出消光比为 8 dB。

图 9 描述了 DPSK 信号波长转换的光谱演化过程,从图 9(a)可以看出,在 SOA 的输出光谱中,

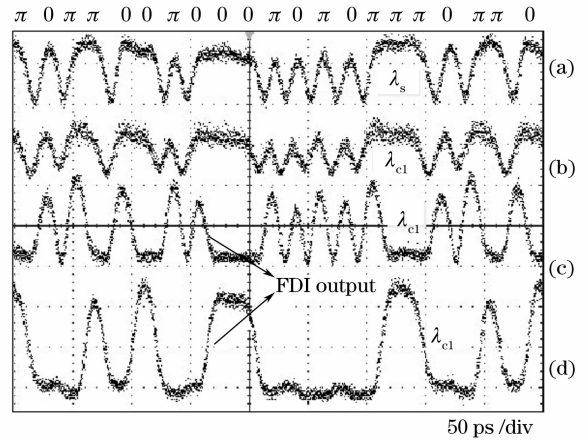


图 8 NRZ-DPSK 信号的波长转换结果,(a) 输入的 NRZ-DPSK 信号,(b) 转换输出的 NRZ-DPSK 信号,(c) 和 (d) 分别是 FDI 的相消端和相涨端的解调信号

Fig. 8 Wavelength conversion with NRZ-DPSK signal, (a) input NRZ-DPSK signal, (b) converted signal of NRZ-DPSK signal, (c), (d) demodulated signal at FDI destructive port and constructive port, respectively

共轭光频率具有和信号光相同的光谱特性,均符合 NRZ-DPSK 信号的特点,都是连续光滑谱而不包含线状谱,虚线是转换后的 NRZ-DPSK 信号光谱。经过 FDI 解调后在相涨端口和相消端的光谱图分别如图 9(b)和图 9(c)所示,其中的插图分别是对应解调后的眼图。

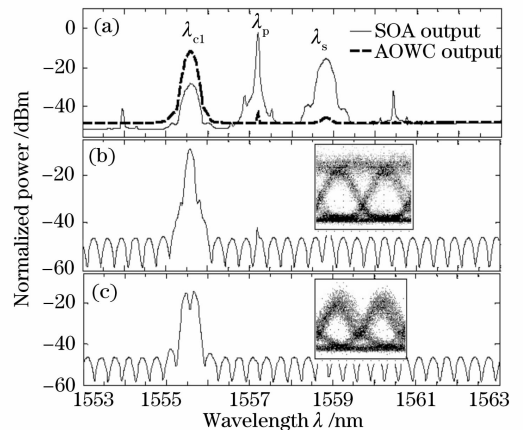


图 9 NRZ-DPSK 信号的波长转换过程中的光谱演化,(a) SOA 的输出光谱和转换光的光谱,(b),(c) 是相涨端和相消端的解调信号

Fig. 9 Spectrum evolution of wavelength conversion with NRZ-DPSK signal, (a) SOA output spectrum and converted spectrum, (b), (c) are the demodulated spectrum at the constructive and destructive ports

将输入的 NRZ-DPSK 信号光调制速率调节至 20 Gb/s,重复以上实验,得到 20 Gb/s 的 NRZ-

DPSK 信号波长转换,经过 FDI 的解调后在相涨端口和相消端口的输出消光比分别为 10.5 dB 和 10.1 dB。值得注意的是,FDI 的两臂的延时量等于单个比特周期,例如对于 40 Gb/s 的 DPSK 信号解调,延时量为 25 ps,而对于 20 Gb/s 的 DPSK 信号解调,延时量则为 50 ps。实验中注意到调制速率越高,基于 FWM 效应的转换光的消光比就越低,这并不意味着速率越高,消光比退化越严重。事实上,基于 SOA 的 FWM 效应是对比特率透明的,原因是实验中的 MZM 调制深度随速率的提高而下降,例如速率为 10 Gb/s 时,输入信号的消光比可达 13 dB,而速率到 40 Gb/s 后,输入的消光比只有 11 dB。这样基于 FWM 效应得到的波长转换的输出消光比退化约为 3 dB。

理论上,多点传送功能只适用于 NRZ 和 RZ 格式,而不适用于 CSRZ 和 DPSK 这样包含相位信息的调制格式,因为交叉增益调制只能对开关键控(OOK)有效。就单信道波长转换而言,FWM 效应对以上各种码型和各种调制速率都适用。但是信号光的调制速率越高,其光谱宽度也越宽,这就要求抽运光和信号光的失谐量不能太小,而 FWM 型波长转换器的转换效率随波长失谐量的增大而急剧下降,所以最终的转换效率就不高。另一方面,就各种码型的比较而言,NRZ 格式的信号具有较窄的光谱宽度,RZ 信号和 DPSK 信号的光谱较宽,因此 NRZ 信号的波长转换较为容易实现,对于光谱较宽的 RZ 信号和 DPSK 信号,利用 FBG 带陷滤波器来消除抽运光信道的串扰。

为了利用 FWM 效应对调制速率透明这个优势,并且在高速波长转换中保持较高的转换效率,未来的工作可以采用垂直双抽运 FWM 方案,该方案可以实现宽带的波长转换,同时在很大频率范围内得到高效率的输出。

3 结 论

从实验上报道了利用 SOA 的 FWM 效应实现各种码型的波长转换,其中对于 NRZ 信号实现了从单信道到三信道的多波长转换,调制速率从 10 Gb/s 到 40 Gb/s 均实现了多波长转换。对于 RZ 信号分别实现了 20 Gb/s 和 40 Gb/s 的 RZ 格式的波长转换和 40 Gb/s 的 CSRZ 格式的波长转换,对于 NRZ-DPSK 信号分别实现了 20 Gb/s 和 40 Gb/s 的波长转换。基于 FWM 效应的转换光的消光比大于 7 dB,转换后消光比退化约为 3 dB。

参 考 文 献

- Xie Yingke, Xia Guangqiong, Wu Jiagui *et al.*. Influences of residual F-P cavity mode on non-degenerated four-wave mixing in distributed-feedback laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(2): 318~322
谢瑛珂,夏光琼,吴加贵等. 分布反馈激光器中剩余法布里-珀罗腔模对非简并四波混频特性的影响[J]. *光学学报*, 2007, **27**(2): 318~322
- Li Peili, Huang Dexiu, Zhang Xinliang *et al.*. Ultrahigh-speed all-optical half adder based on four-wave mixing in semiconductor optical amplifier[J]. *Opt. Exp.*, 2006, **14**(24): 11839~11847
- M. P. Fok, C. Shu. Multipump four-wave mixing in a photonic crystal fiber for 6×10 Gb/s wavelength multicasting of DPSK signals [J]. *Photon. Technol. Lett., IEEE*, 2007, **19**(15): 1166~1168
- Ken Mishina, Satoru Kitagawa, Akihiro Maruta. All-optical modulation format conversion from on-off-keying to multiple-level phase-shift-keying based on nonlinearity in optical fiber[J]. *Opt. Exp.*, 2007, **15**(13): 8444~8453
- M. P. Fok, C. Shu. Multi-pump four-wave mixing in a semiconductor optical amplifier for wavelength multicast of NRZ-DPSK signals[C]. *Optical Amplifiers and Their Applications (OAA)*, 2006, **OTuC5**: 1~3
- Wang Zhaoying, Li Zhiyong, Ge Chunfeng *et al.*. Widely tunable all-optical wavelength converter based on four-wave mixing using two orthogonally polarized pumps[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2004, **2**(6): 351~353
- G. Contestabil, M. Presi, E. Ciaramella. Multiple wavelength conversion for WDM multicasting by FWM in an SOA [J]. *Photon. Technol. Lett., IEEE*, 2004, **16**(7): 1775~1777
- H. Wen, H. Jiang, X. Zheng. Performance enhancement of multiwavelength conversion of RZ-DPSK based on four-wave mixing in semiconductor optical amplifier[J]. *Photon. Technol. Lett., IEEE*, 2007, **19**(18): 1377~1379
- Dong Jianji, Zhang Xinliang, Wang Yang *et al.*. 40 Gbit/s reconfigurable photonic logic gates based on various nonlinearities in single SOA[J]. *Electron. Lett.*, 2007, **43**(16): 884~886
- Ding Yuan, Zhang Xinliang, Dong Jianji *et al.*. Improvement for all-optical logical AND gate based on cascaded semiconductor optical amplifiers[J]. *Chin. J. Lasers*, 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
- Wang Hua, Yao Minyu, Zhang Hongming *et al.*. Multi-wavelength fiber ring laser with semiconductor optical amplifier [J]. *Chin. J. Lasers*, 2007, **34**(11): 1502~1506
王华,姚敏玉,张洪明等. 采用半导体光放大器的多波长光纤环形激光器[J]. *中国激光*, 2007, **34**(11): 1502~1506
- Dong Jianji, Zhang Xinliang, Ding Yuan *et al.*. High speed wavelength conversion and format conversion based on semiconductor optical amplifier and optical filter[J]. *Chin. J. Lasers*, 2007, **34**(7): 940~944
董建绩,张新亮,丁园等. 利用半导体光放大器和滤波器组合实现高速波长转换和码型转换[J]. *中国激光*, 2007, **34**(7): 940~944
- Wang Xin, Zhang Xinliang. Generation of modified duobinary RZ format polarization maintaining fiber loop mirror[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(2): 69~70
- Xu Xiaogeng, Zhang Xinliang, Liu Deming *et al.*. Experimental study on transmission performance of three different formats in 40 Gb/s optical fiber communication system [J]. *Chin. J. Lasers*, 2005, **32**(10): 1371~1376
徐晓庚,张新亮,刘德明等. 40 Gb/s 光纤通信系统中不同码型传输特性的实验研究[J]. *中国激光*, 2005, **32**(10): 1371~1376
- A. H. Gnauck, P. J. Winzer. Optical phase-shift-keyed transmission [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2005, **23**(1): 115~130