

doi: 10.3788/gzxb20144305.0506003

基于半导体光放大器垂直双泵浦对偏振复用正交相移键控信号波长变换的性能研究

周慧, 何晶, 陈林

(湖南大学 信息科学与工程学院 微纳光电器件及应用教育部重点实验室, 长沙 410082)

摘 要: 针对偏振复用相位调制信号的全光波长变换特性问题, 基于半导体光放大器中四波混频效应, 建立了对偏振复用正交相移键控信号的全光波长变换理论模型. 根据理论分析, 建立了仿真系统, 仿真结果表明: 泵浦光与信号光之间的频率间隔、偏振复用信号中的一个信号与一号泵浦光的偏振夹角对系统转换效率和信号质量有影响; 波长转换过程中交叉相位调制产生的相位噪音会对信号质量有影响, 且当泵浦光功率较大、泵浦光功率远大于信号光功率时, 交叉相位调制效应的影响较小, 仿真结果与理论分析一致. 本文研究方法和相关结论对其它偏振复用信号基于半导体光放大器四波混频效应的波长变换研究有一定的参考价值.

关键词: 光通信技术; 正交相移键控; 全光波长变换; 四波混频; 半导体光放大器

中图分类号: TN929.9

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2014)05-0506003-10

Research on All-optical Wavelength Conversion Based on Orthogonal Dual-pump Four-wave Mixing in Semiconductor Optical Amplifier for Polarization Multiplexing Quadrature Phase Shift Keying Signals

ZHOU Hui, HE Jing, CHEN Lin

(Key Laboratory of Micro/Nano Optoelectronic Devices of Ministry of Education, School of Information Science and Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: Based on orthogonal dual-pump four wavelength mixing in an semiconductor optical amplifier, theoretical model of all-optical wavelength conversion for polarization multiplexing quadrature phase shift keying signals was set up for studying the characteristics of wavelength conversion for polarization multiplexing phase-modulated signals. The simulation system was built based on the theoretical analysis. Results show that the frequency spacing between the pump and signal lightwave, the polarization angle between pump1 and one of the polarization multiplexing signals have effects on the conversion efficiency and the quality of the signals; and the phase noise generated by cross phase modulation in wavelength conversion also has effect on the quality of the signals, and when the power of two pumps is much larger than that of the signal lightwave, the cross phase modulation has small effect on the quality of the signals. The simulation results are consistent with the theoretical analysis. The methods and some results can be useful to research wavelength conversion system for other polarization multiplexing signal based on four wavelength mixing in SOA.

Key words: Optical communication; Quadrature Phase Shift Keying (QPSK); All-optical wavelength conversion; Four-Wave Mixing (FWM); Semiconductor Optical Amplifier (SOA)

OCIS Codes: 060.0060; 060.4370; 060.5060

基金项目: 国家自然科学基金(No. 61377079)、国家高技术研究发展计划(No. 2011AA010203)、湖南省自然科学基金(No. 12JJ3070)和信息光子学与光通信国家重点实验室(北京邮电学院)开放式基金资助

第一作者: 周慧(1984-), 女, 博士研究生, 主要研究方向为光纤无线通信技术和全光波长变换技术等. Email: zh_zhou_hui@163.com

导师(通讯作者): 陈林(1968-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为新调制格式技术和光纤无线通信技术等. Email: liliuchen12@vip.163.com

收稿日期: 2013-09-25; **录用日期:** 2013-11-25

<http://www.photon.ac.cn>

0 引言

全光波长变换技术是波分复用 (Wavelength Division Multiplexing, WDM) 光网络中的关键技术. 通过波长变换, 可以实现波长动态分配, 异种网络的互连, 有效地解决网络中受有限波长信道数量限制的交通拥塞, 提高网络的灵活性、智能性和生存性^[1]. 而且, 由于网络中不同波长通道的数据调制格式可能不同, 因此波长变换器需要对数据格式透明^[2]. 全光波长变换可以通过交叉增益调制 (Cross Gain Modulation, XGM) 和交叉相位调制 (Cross Phase Modulation, XPM) 来实现^[3-5]. 由于四波混频 (Four-Wave Mixing, FWM) 对信号速率和调制形式透明, 基于四波混频的波长转换被广泛地应用在光通信系统中. 四波混频可以在半导体光放大器 (Semiconductor Optical Amplifier, SOA) 和高非线性光纤 (High Nonlinearity Fiber, HNLF) 中实现. 但是, 基于 SOA 中 FWM 效应的波长变换技术与采用 HNLF 中 FWM 效应的波长变换技术相比具有响应时间短和避免非线性以及色散效应影响的优势^[6-12].

采用偏振复用技术可以增加系统信号的传输能力和光谱效率^[13]. 基于数字信号处理 (Digital Signal Processor, DSP) 技术的相干光通信因其能将复杂的色散补偿、载波恢复等转移到电域, 已经成为近年来的研究热点^[14-15]. 目前国内采用 SOA 对开关键控 (On-off Keying, OOK) 偏振复用信号的波长变换进行了理论和仿真的研究, 但对基于相干检测的偏振复用相位调制信号的全光波长变换还缺乏相关的研究^[16]. 国外采用

非线性光纤已实现了偏振复用相位调制信号的全光波长变换^[17-18]. 但是, 这些研究绝大多数为实验研究, 对采用 SOA 实现偏振复用相位调制信号的波长变换特性的研究缺乏理论分析和仿真验证.

本文理论和仿真研究了偏振复用正交相移键控 (Polarization Multiplexing-Quadrature Phase Shift Keying, PM-QPSK) 信号基于垂直双泵浦结构的 SOA 波长变换特性. 仿真实现了 40Gbit/s 的偏振复用 QPSK 信号的波长变换, 验证了理论分析的正确性. 研究了泵浦光与信号光之间的频率间隔、信号光与一号泵浦光的偏振夹角对系统转换效率和信号质量的影响. 还讨论了波长变换中 XPM 效应对转换光信号质量的影响: 当泵浦光功率较小、信号光功率远大于泵浦光功率时, 会发生显著的 XPM 效应; 当泵浦光与信号光功率可比拟、且泵浦光功率较小时, 发生 FWM 效应和 XPM 效应; 当泵浦光功率较大、泵浦光功率远大于信号光功率时, 会发生显著的 FWM 效应.

1 理论分析

1.1 基于垂直双泵浦结构的偏振复用 QPSK 信号的波长变换

系统原理如图 1. 两个连续光波 (CW_1 和 CW_2) 作为两个泵浦光, 且两个泵浦光偏振方向垂直. 集成正交 (IQ) 调制器将两路非归零 (NRZ) 码调制到连续光波 CW_3 的两个正交相位上产生光 QPSK 信号. 由 IQ 调制器输出的 QPSK 光信号由偏振分束器 (PBS) 分成两路: 一路信号经过延时与另一路信号通过偏振合束器 (PBC) 耦合, 形成偏振复用 QPSK 信号, 其产生的 PM-

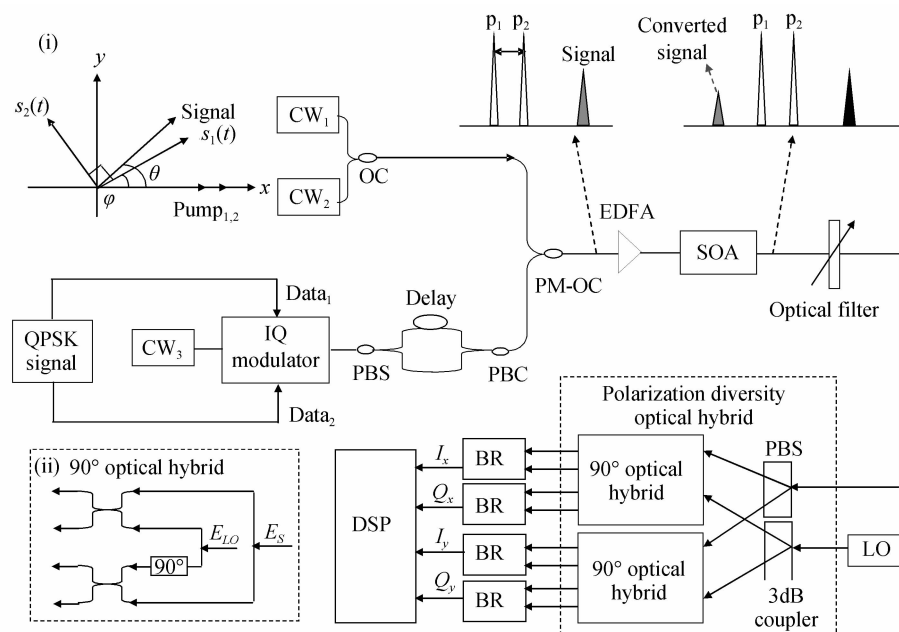


图 1 基于 SOA 中四波混频效应实现偏振复用 QPSK 信号的全光波长变换原理

Fig. 1 Principle of wavelength conversion for PM-QPSK signal based on four wave mixing in SOA

QPSK 信号光与两个泵浦光耦合后送入 SOA 中进行波长变换,如图 1(i)所示,假设两个泵浦光的偏振方向分别为 x 和 y 方向,信号光相对于一号泵浦光(x 方向)的夹角为 θ ,两个偏振复用信号的偏振方向相对于一号泵浦光(x 方向)的夹角分别为 φ 和 $\varphi + 90^\circ$. 假设两路泵浦光和信号光的表达式分别为: $\mathbf{E}_i(\omega_i, \mathbf{r}, t) = \mathbf{E}_i(\omega_i, \mathbf{r}) \exp j(k_i z - \omega_i t + \varphi_i)$ ($i=1,2,3$),其中, k_i, ω_i, φ_i 分别为光的波矢、角频率和相位, $i=1,2,3$ 分别对应一号泵浦、二号泵浦和信号光.

$$\begin{aligned} \mathbf{E}_3(\omega_3, \mathbf{r}, t) = & A_3 \sqrt{G_x} \{ S_I(t) \exp(k_3 z - j\omega_3 t + \varphi_3) - S_Q(t) \exp(k_3 z - j\omega_3 t + \pi/2 + \varphi_3) \} \cos(\theta - \varphi) \cdot \\ & \cos(\varphi) + [S_I(t) \exp(k_3 z - j\omega_3 t + \varphi_3) - S_Q(t) \exp(k_3 z - j\omega_3 t + \pi/2 + \varphi_3)] \sin(\theta - \varphi) \cos(\varphi + \pi/2) \} \mathbf{x} + \\ & A_3 \sqrt{G_y} \{ [S_I(t) \exp(k_3 z - j\omega_3 t + \varphi_3) - S_Q(t) \exp(k_3 z - j\omega_3 t + \pi/2 + \varphi_3)] \cos(\theta - \varphi) \sin(\varphi) + [S_I(t) \cdot \\ & \exp(k_3 z - j\omega_3 t + \varphi_3) - S_Q(t) \exp(k_3 z - j\omega_3 t + \pi/2 + \varphi_3)] \sin(\theta - \varphi) \sin(\varphi + \pi/2) \} \mathbf{y} \end{aligned} \quad (3)$$

如文献[9]所述,由于 SOA 的三阶非线性作用,有三个拍频频率 $\omega_1 - \omega_2, \omega_1 - \omega_3, \omega_2 - \omega_3$ 分别调制泵浦光与信号光,产生新的频率的转换光. 考虑频率为 $\omega_1 - \omega_2$

两路 QPSK 信号 $s_1(t)$ 和 $s_2(t)$ 可分别写为: $s_1(t) = s_{I_1}(t) + js_{Q_1}(t), s_2(t) = s_{I_2}(t) + js_{Q_2}(t)$, 其中 $s_{I_1}(t)$ 和 $s_{Q_1}(t)$ 分别为 $s_1(t)$ 的同相和正交分量, $s_{I_2}(t)$ 和 $s_{Q_2}(t)$ 分别为 $s_2(t)$ 的同相和正交分量. $s_1(t)$ 和 $s_2(t)$ 分别调制到光波 $\mathbf{E}_3(\omega_3, t)$ 的两个正交偏振态上实现偏振复用. 因此,泵浦光与调制了偏振复用信号的信号光经过 SOA 增益后放大后的表达式分别为

$$\mathbf{E}_1(\omega_1, \mathbf{r}, t) = A_1 \sqrt{G_x} \exp j(k_1 z - \omega_1 t + \varphi_1) \mathbf{x} \quad (1)$$

$$\mathbf{E}_2(\omega_2, \mathbf{r}, t) = A_2 \sqrt{G_x} \exp j(k_2 z - \omega_2 t + \varphi_2) \mathbf{y} \quad (2)$$

+ ω_3 的转换光,它由两部分组成,一部分由拍频信号 $\omega_1 - \omega_3$ 调制 ω_2 得到,另一部分由拍频信号 $\omega_2 - \omega_3$ 调制泵浦光 ω_1 得到,因此新的边带转换光输出为

$$\begin{aligned} \mathbf{E}_{S_1}(t) = (\mathbf{E}_1 \cdot \mathbf{E}_3^*) \mathbf{E}_2 = & A_1 A_2 A_3 e^{j(\omega_1 + \omega_2)t} e^{j(\varphi_1 + \varphi_2)} r(\omega_1 - \omega_3) G_x \sqrt{G_y} \mathbf{y} \times \{ [s_{I_1}(t) \exp(j(-\omega_3 t - \varphi_3)) - s_{Q_1}(t) \cdot \\ & \exp(j(-\omega_3 t - \pi/2 - \varphi_3))] \cos(\theta - \varphi) \cos(\varphi) + [s_{I_2}(t) \exp(j(-\omega_3 t - \varphi_3)) - s_{Q_2}(t) \exp(j(-\omega_3 t - \pi/2 - \varphi_3))] \cdot \\ & \sin(\theta - \varphi) \cos(\theta - \varphi) \} \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{E}_{S_2}(t) = (\mathbf{E}_2 \cdot \mathbf{E}_3^*) \mathbf{E}_1 = & A_1 A_2 A_3 e^{j(\omega_1 + \omega_2)t} e^{j(\varphi_1 + \varphi_2)} r(\omega_1 - \omega_3) G_y \sqrt{G_x} \mathbf{x} \times \{ [s_{I_1}(t) \exp(j(-\omega_3 t - \varphi_3)) - s_{Q_1}(t) \cdot \\ & \exp(j(-\omega_3 t - \pi/2 - \varphi_3))] \cos(\theta - \varphi) \sin(\theta) + [s_{I_2}(t) \exp(j(-\omega_3 t - \varphi_3)) - s_{Q_2}(t) \exp(j(-\omega_3 t - \pi/2 - \varphi_3))] \cdot \\ & \sin(\theta - \varphi) \cos(\varphi + \pi/2) \} \end{aligned} \quad (5)$$

式中, $r(\omega_1 - \omega_3)$ 和 $r(\omega_2 - \omega_3)$ 是转换系数^[9], 其与频率间隔成反比; A_1, A_2 和 A_3 分别为经过四波混频转换后的抽运光与信号光的幅度. G_x 和 G_y 分别表示 SOA 中 x 方向和 y 方向的增益. 理想情况下, $G_x = G_y$. 当 $\varphi = n\pi/2$ ($n=0,1,\dots$) 时,代入式(4)和(5),新产生的频率光波 $\omega_1 - \omega_2 + \omega_3$ 可以表示为

$$\begin{aligned} \mathbf{E}_{S_1}(t) = & (\mathbf{E}_1 \cdot \mathbf{E}_3^*) \mathbf{E}_2 + (\mathbf{E}_2 \cdot \mathbf{E}_3^*) \mathbf{E}_1 = A_1 A_2 A_3 \cdot \\ & G_y \sqrt{G_x} \exp j(\omega_1 + \omega_2)t \exp j(\varphi_1 + \varphi_2) \times \{ r(\omega_2 - \\ & \omega_3) [s_{I_1}(t) \exp j(-\omega_3 t - \varphi_3) - s_{Q_1}(t) \exp j(-\omega_3 t - \\ & \pi/2)] \sin(\theta - \varphi) \cos(\varphi + \pi/2) \mathbf{x} + r(\omega_1 - \omega_3) \cdot \\ & [s_{I_2}(t) \exp j(-\omega_3 t - \varphi_3) - s_{Q_2}(t) \exp j(-\omega_3 t - \pi/2)] \cdot \\ & \sin(\theta - \varphi) \sin(\theta - \varphi) \mathbf{y} \} \end{aligned} \quad (6)$$

1.2 采用偏振分集相干检测对转换光进行接收

在接收端,经过光滤波器滤出新产生的信号光. 将新产生的信号光和本振光源送入偏振分集光耦合器进行混频和相干检测. 在偏振分集光耦合器中,新产生的信号光和本振光分别被两个偏振分束器(Polarizing Beam Splitter, PBS)分成相等功率的两束光($\theta - \varphi = 45^\circ$),则每个 90° 混频器的输入为新产生的信号光和其同偏振态的本振光. 90° 混频如图 1(ii)所示. 首先来讨

论 x 偏振方向的检测: PBS 输出的 x 偏振方向的光经过 3 dB 耦合器再分成等功率的两束光波,每束光波可以表示为

$$\begin{aligned} \mathbf{E}_{S_1}(t) = & \frac{A_1 A_2 A_3}{2} r(\omega_2 - \omega_3) \exp j(\omega_1 + \omega_2 - \omega_3)t \times \\ & \exp j(\varphi_1 + \varphi_2 - \varphi_3) \times s_{I_1}(t) \exp j(\omega_1 - \omega_2 + \omega_3)t - \\ & s_{Q_1}(t) \exp j[(\omega_1 - \omega_2 + \omega_3)t + \pi/2] \mathbf{x} \end{aligned} \quad (7)$$

同理,本振光经过 PBS 和 3dB 耦合器之后可以表示为

$$\mathbf{E}_L = \frac{A_L}{2} \exp j(\omega_L t + \pi/2) \quad (8)$$

采用零差检测进行相干接收,即 $\omega_1 - \omega_2 + \omega_3 = \omega_L$, 则每个 90° 光混频器的输入为

$$\begin{aligned} \mathbf{E}_L + \mathbf{E}_{S_1}(t) = & \frac{A_L}{2} \exp j(\omega_L t + \pi/2) + \frac{A_1 A_2 A_3}{2} r(\omega_2 - \\ & \omega_3) \times [s_{I_1}(t) \exp j(\omega_L t) + s_{Q_1}(t) \exp j(\omega_L t + \pi/2)] = \\ & \frac{1}{2} e^{j(\omega_L t)} \{ A_L \exp j(\pi/2) + A_1 A_2 A_3 R_1 [s_{I_1}(t) + s_{Q_1}(t) \cdot \\ & \exp j(\pi/2)] \exp j(\omega_1 + \omega_2 - \omega_3)t \} \end{aligned} \quad (9)$$

式中, $R_1 = r(\omega_2 - \omega_3)$. 令 $a = A_1 A_2 A_3 R_1 [s_{I_1}(t) - s_{Q_1}(t) \cdot \exp j(\pi/2)]$, $b = A_L$, $R_1 = r(\omega_2 - \omega_3)$, 得到

$$\mathbf{E}_L + \mathbf{E}_{s_1}(t) = \frac{1}{2} \exp j(\omega_L t) [b \exp j(\pi/2) + a] \quad (10)$$

因此,经过光电检测器后的光电流为

$$I_1(t) - I_2(t) = \frac{1}{4} [a + b \exp j(\pi/2)] \times [a^* + b^* \cdot \exp j(-\pi/2)] - \frac{1}{4} [a \exp j(\pi/2) + b] \times [a^* \exp j(-\pi/2) + b^*] = \text{Im}(ab^*) \quad (11)$$

当 b 为纯虚数 bi 时(转换光与本振光的相位差为 $\pi/2$),得到 $s_1(t)$ 的 I 分量,即平衡接收机(BR1)的输出为

$$I_1(t) - I_2(t) = \text{Im}\{A_1 A_2 A_3 R_1 [S_I(t) - S_Q(t) \times (\cos(\pi/2) + i \sin(\pi/2))] bi\} = A_1 A_2 A_3 R_1 b S_I(t) \quad (12)$$

当 b 为正实数 b 时(转换光与本振光的相位差为 0),得到 $s_1(t)$ 的 Q 分量,即BR2的输出为

$$I_1(t) - I_2(t) = \text{Im}\{A_1 A_2 A_3 R_2 b [S_I(t) - S_Q(t) \times (\cos(\pi/2) + i \sin(\pi/2))]\} = A_1 A_2 A_3 R_2 b S_Q(t) \quad (13)$$

同理, y 偏振方向上经过 90° 混频器得到 $s_2(t)$ 的 I 分量和 Q 分量分别为

$$I_1(t) - I_2(t) = A_1 A_2 A_3 R_2 b S_I(t) \quad (14)$$

$$I_1(t) - I_2(t) = A_1 A_2 A_3 R_2 b S_Q(t) \quad (15)$$

式中, $R_2 = r(\omega_1 - \omega_3)$. 因此,当满足条件 $\varphi = n\pi/2$ ($n = 0, 1, \dots$)时,经过波长变换后,得到无偏振串扰的偏振复用 QPSK 信号。

2 仿真及结果分析

由于相干光通信系统对光源的相位噪声很敏感,仿真采用 Optisystem 软件使用的光源均为线宽小于 100 KHz 的外部腔式激光器(External Cavity Laser, ECL). IQ 调制器将两路 10 Gbit/s 的伪随机序列调制到由 ECL 产生的频率为 193.13 THz、功率为 0 dBm 的光载波上. 数据信号是 NRZ 码,峰峰值为 1 V,数据源经过电放大器放大到峰峰值为 4V. IQ 调制器由两个并行的马赫曾德尔调制器(Mach-Zehnder Modulator, MZM)构成. 调节 IQ 调制器的偏置电压与两路数据信号的延时,使两路数据正好被调制到光载波的两个正交的相位上. 输出 IQ 调制器的光 QPSK 信号由偏振分支器分成两路,其中一路经 1 ms 的延时后与另一路通过偏振耦合器合并,形成偏振复用 QPSK 信号. 两个 ECL 产生频率为 193.22 THz、193.29 THz 的两个泵浦光,光功率分别为 9 和 10 dBm. 两个泵浦光与信号光经过光耦合器(Optical Coupler, OC)耦合后送入 SOA 中进行波长变换. 注入 SOA 的光谱如图 2(a)所示. 仿真中 SOA 的参量如表 1. 经过四波混频后,新产生的转换光波频率为 193.38 THz. SOA 输出端的光谱图如图 2(b). 采用光可调滤波器(Optic Tunable Filter, OTF)将转换光滤取送入偏振分集的 90° 光混频

器,与放大至 20dBm 的本振光(Local Optic, LO)混频. 光混频器分别分离出两个正交偏振态上的 I 和 Q 分量,然后通过 4 个平衡接收机(Balanced Receiver, BR)进行接收,平衡接收机输出的电信号再进行离线数字信号处理. 原始信号和波长变换后解调得到的星座图如图 3,从图 3(a)、(d)可以看出,经过波长变换后星座图清晰可辨.

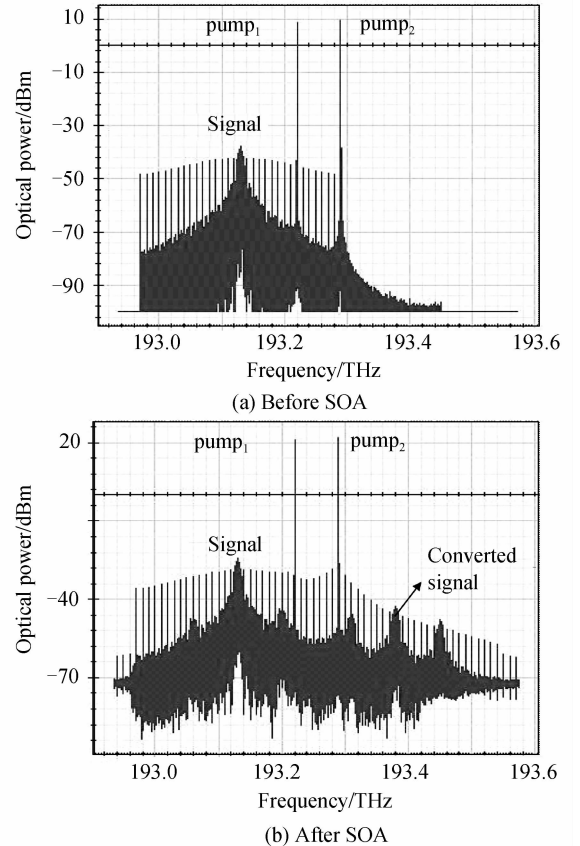


图 2 进 SOA 和出 SOA 的光谱图

Fig. 2 The optical spectrum before and after the SOA

表 1 SOA 参量

Table 1

Parameters	Value
Length/m	0.0005
Width/ μm	3.0
Thickness/ μm	0.08
Bias current/A	0.32
Optical confinement factor	0.3
Internal loss/ m^{-1}	2 000
Differential gain/ m^2	2.78×10^{-20}
Recombination coefficient A/s^{-1}	1.43×10^8
Recombination coefficient $B/(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	1×10^{-16}
Recombination coefficient $C/(\text{m}^5 \cdot \text{s}^{-1})$	3×10^{41}
Initial carrier density/ m^3	3×10^{24}

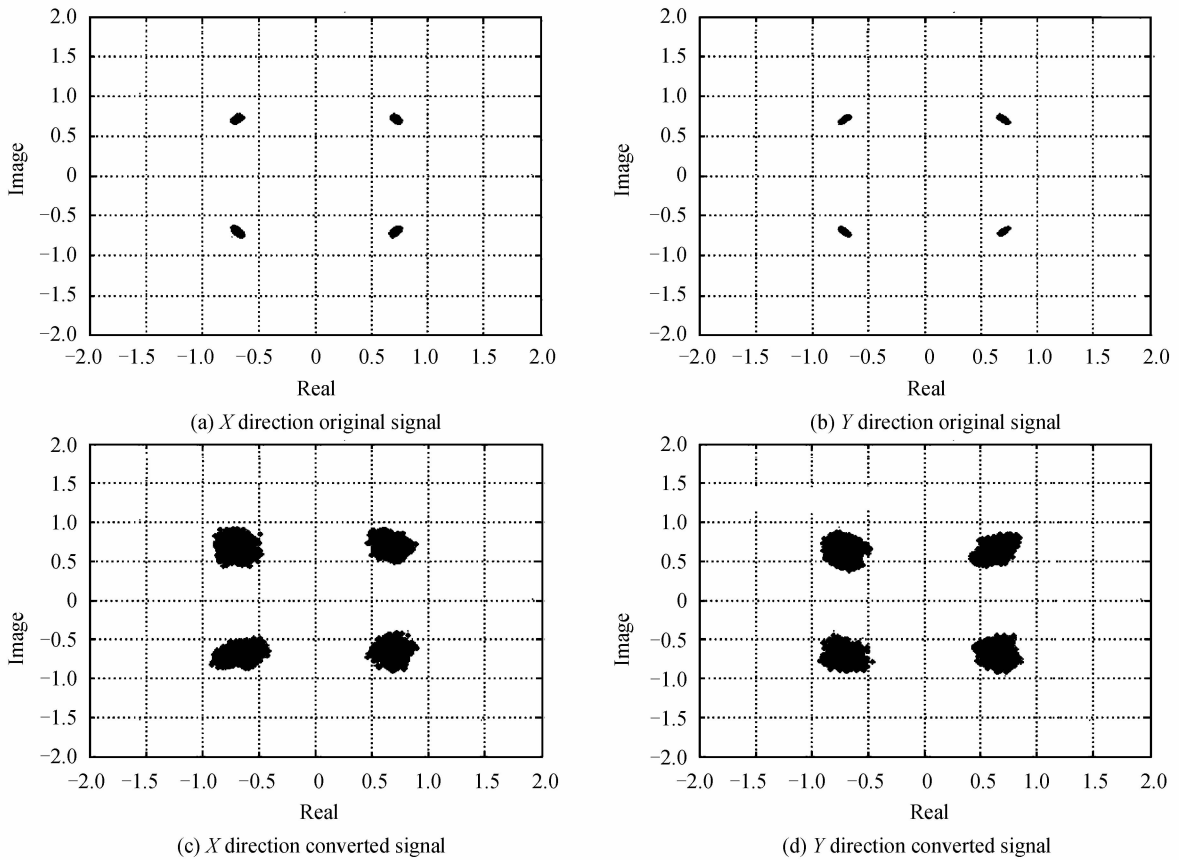


图3 原 PM-QPSK 信号光和转换光的 PM-QPSK 信号光的接收星座图

Fig. 3 The received constellations of the optical PM-QPSK signal

在此仿真平台上,研究了泵浦光与信号光频率间距对系统转换效率和转换光信号质量的影响,对两个偏振方向上无串扰接收的条件进行了验证,还对波长变换过程中交叉相位调制产生的相位噪声对信号质量

的影响进行了讨论。

固定一号泵浦光的频率,逐渐增大二号泵浦光的频率,得到二号泵浦光与信号光不同频率间隔对应的转换效率的曲线图和相应的星座图如图4。由于增大

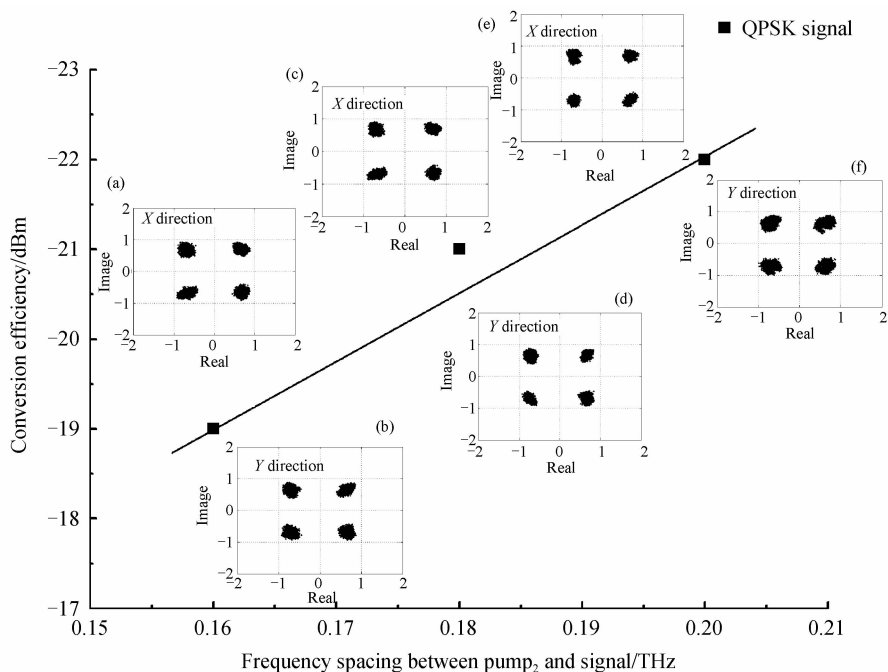


图4 二号泵浦光与信号光的不同的频率间隔对应的转换效率和星座图

Fig. 4 Conversion efficiency trend curve and constellations versus different frequency spacing between pump₂ and signal lightwave

二号泵浦光的频率等效于增大二号泵浦光与信号光的频率间隔,并且转变效率函数 $r(\omega_2 - \omega_3)$ 与频率间隔 $\Delta\omega_{s-p2}$ 成反比. 因此,从式(12)~(13)可以当二号泵浦光与信号光的频率间隔不同时得到的转换效率. 图4为二号泵浦光与信号光的频率间隔不同时得到的星座图. 图4(a)~(b)为频率间隔为 0.16 THz 时的星座图,图4(c)~(d)为频率间隔为 0.18 THz 时的星座图,图4(e)~(f)为频率间隔为 0.2 THz 时的星座图. 从图4可以看出,随着二号泵浦光与信号光的频率间隔增大,转换效率降低,信号质量变差.

固定二号泵浦光的频率,逐渐增大一号泵浦光的频率,得到不同频率间隔对应转换效率的曲线图和相应的

星座图如图5所示. 由于增大一号泵浦光的频率等效于增大一号泵浦与信号光的频率间隔,并且转变效率函数 $r(\omega_1 - \omega_3)$ 与频率间隔 $\Delta\omega_{s-p1}$ 成反比. 因此,从式(14~15)可以看出,转换光的功率随着 $\Delta\omega_{s-p1}$ 的增加而减小,从而转换效率随着 $\Delta\omega_{s-p1}$ 的增加而减小. 图5中各点为当二号泵浦光与信号光的频率间隔不同时得到的转换效率. 图5为一号泵浦光与信号光的频率间隔不同时得到的星座图. 图5(a)~(b)为频率间隔为 0.08 THz 时的星座图,图5(c)~(d)为频率间隔为 0.1 THz 时的星座图,图5(e)~(f)为频率间隔为 0.12 THz 时的星座图. 从图5可以看出,随着一号泵浦光与信号光的频率间隔增大,转换效率降低,信号质量变差.

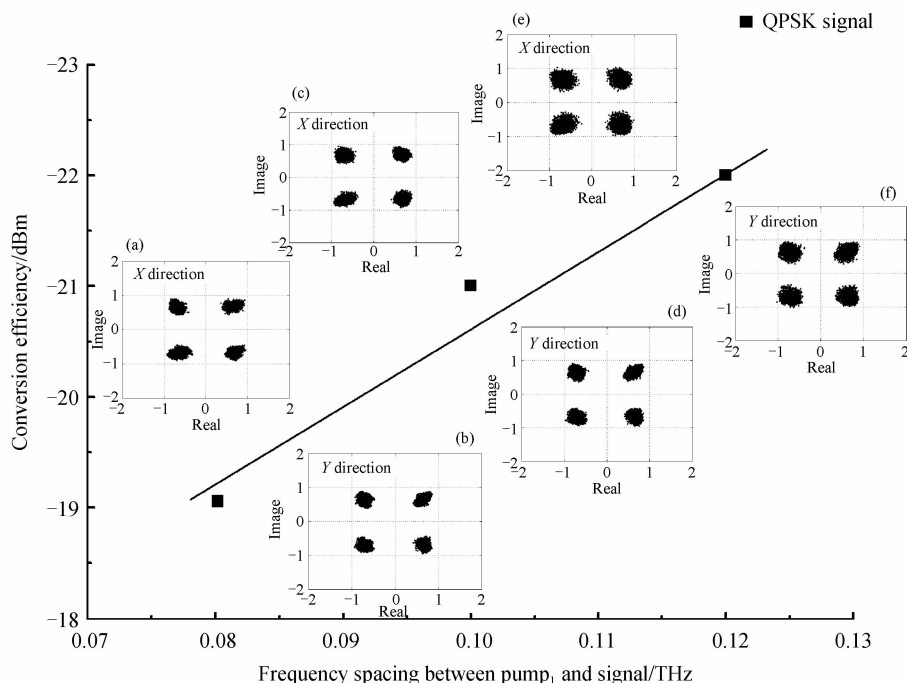
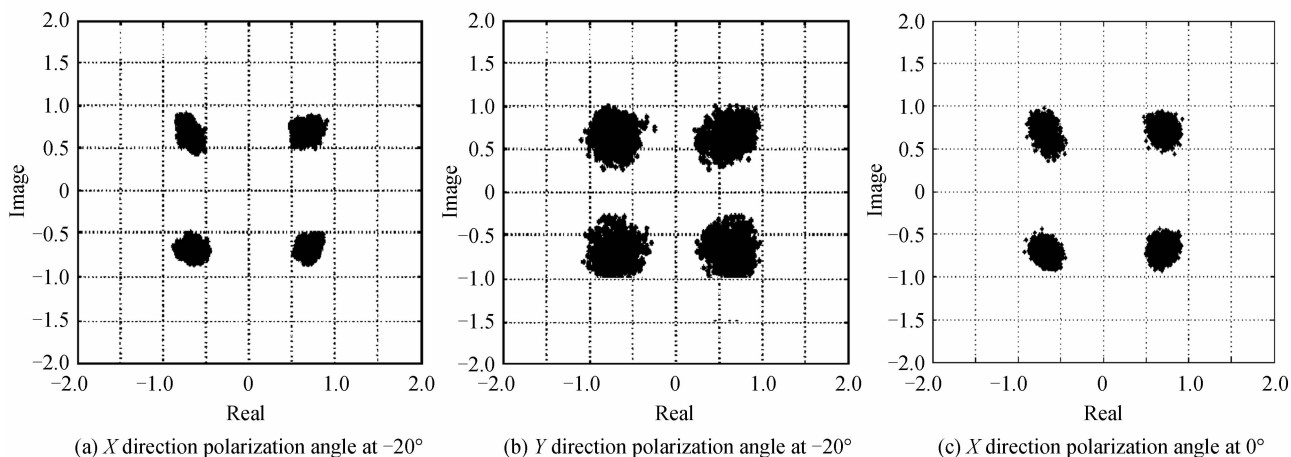


图5 一号泵浦光与信号光的不同的频率间隔对应的转换效率和星座图

Fig. 5 Conversion efficiency trend curve and constellations versus different frequency spacing between pump₁ and signal lightwave

固定信号光和泵浦光的频率,改变信号光与一号泵浦光的偏振夹角,得到对应的星座图如图6. 图6(a)~(d)分别为信号光偏振夹角 $-20^\circ, 0^\circ, 20^\circ$ 和 90° 时转

换光信号的星座图. 理论分析可知,当信号 $s_1(t)$ 与一号泵浦光的偏振夹角为 $\varphi = n\pi/2 (n=0, 1)$ 时,在接收端可以实现无串扰偏振复用信号的接收. 从图6(a)、



(a) X direction polarization angle at -20°

(b) Y direction polarization angle at -20°

(c) X direction polarization angle at 0°

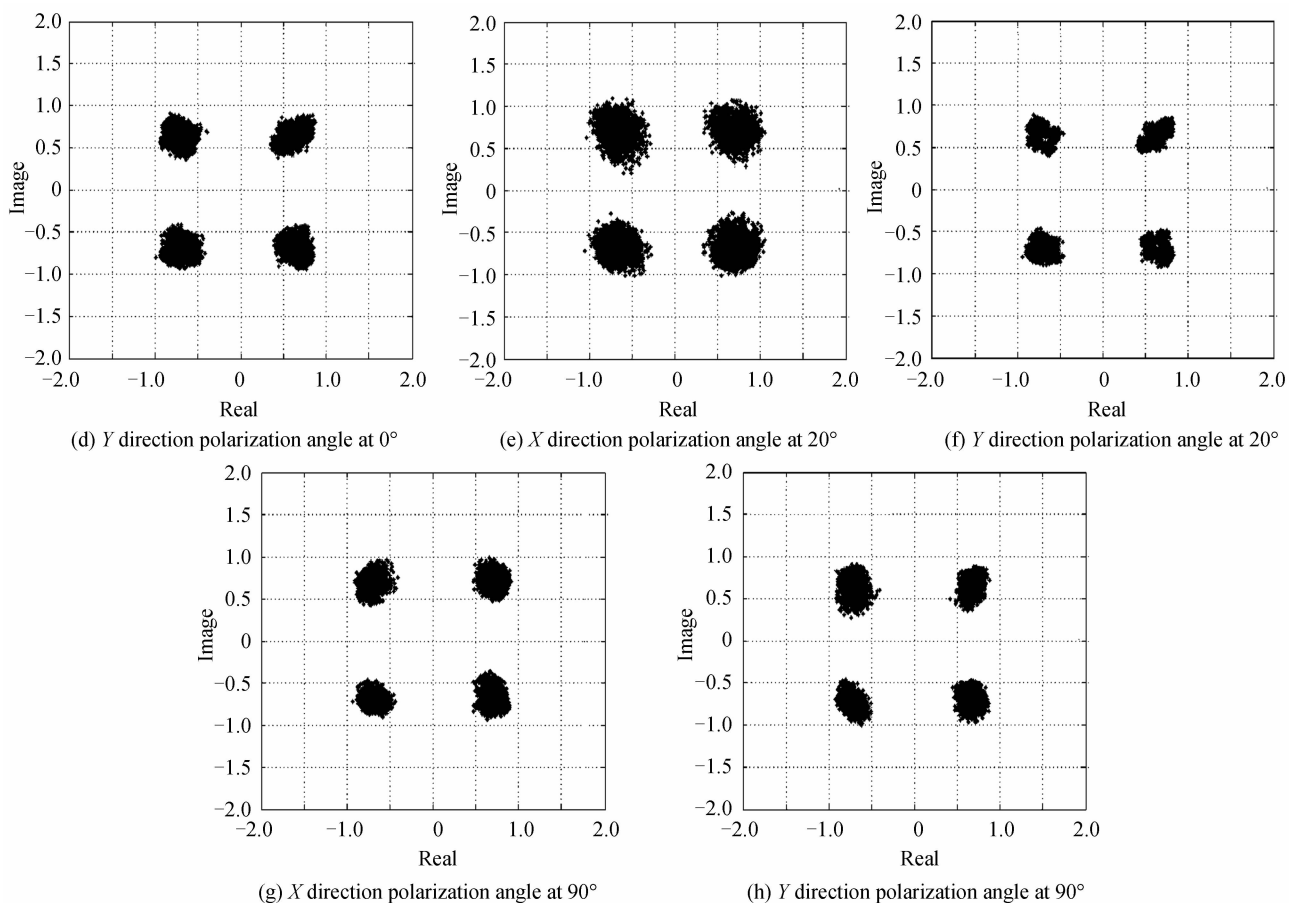


图 6 信号光在不同偏振夹角时接收到的转换光信号的星座图

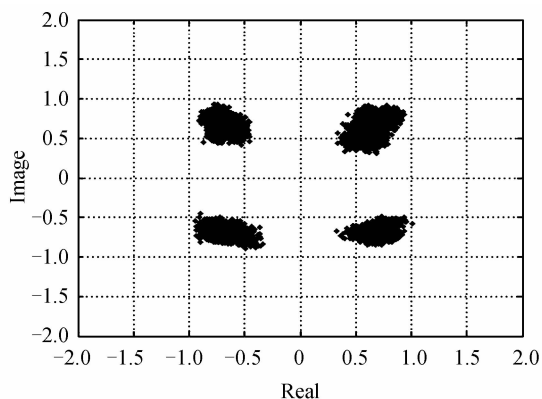
Fig. 6 Constellation figures of the converted signal at different polarization angle of signal lightwave

(b)和6(e)、(f)可以看出,当偏振夹角为 -20° 和 20° 时, x 和 y 偏振方向的星座图都变差,这是由于两个偏振方向的信号发生了串扰.从图6(c)、(d)和6(g)、(g)可以看出,当偏振夹角为 0° 和 90° 时,星座图清晰可辨.

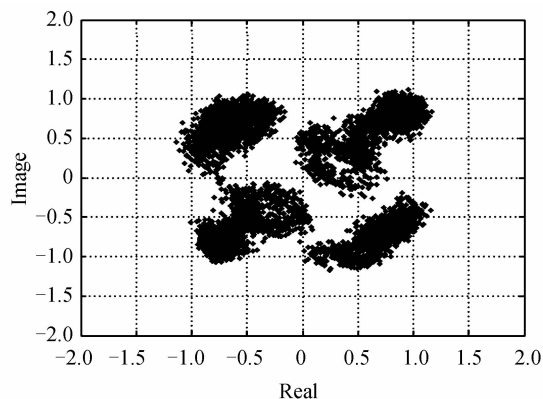
QPSK信号是恒包络信号,信号光注入SOA会消耗SOA有源区中的载流子,使得载流子浓度发生变化,进而使折射率发生变化.由信号光引起的折射率变化会对转换光引入附加相位.因此,在波长变换过程中,除了发生四波混频效应以外,还会发生交叉相位调

制效应,则转换光信号会有由交叉相位调制引起的相位噪声.由于QPSK信号为相位调制信号,因此XPM效应带来的相位噪声对信号质量会有较大的影响.

两个泵浦光功率分别为3 dBm和4 dBm,信号光分别为5 dBm、10 dBm时转换光信号的星座图见图7(c)、(d).从图7(a)、(b)可以看出, x 方向的星座图很差,而 y 方向的星座图比较好,这是由于波长变换过程中除了发生FWM效应外还发生了XPM效应.而且由于SOA折射率的偏振依赖性,两个偏振方向上XPM



(a) X direction power of signal is 5dBm



(b) Y direction power of signal is 5dBm

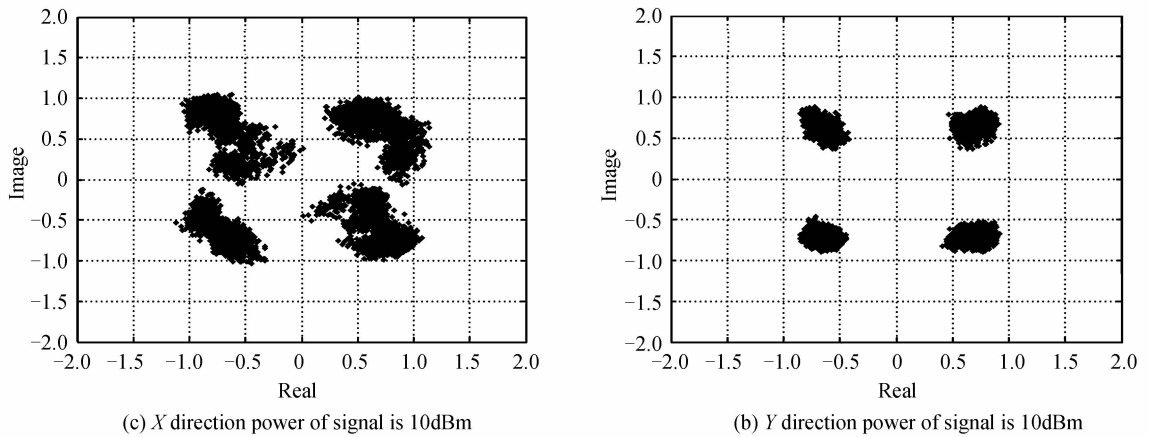


图 7 两个泵浦光功率分别为 3 dBm 和 4 dBm, 信号光功率为 5 dBm 和 10 dBm 时转换光的星座图

Fig. 7 Constellation figures of the converted signal at signal power 5 dBm and 10 dBm when two pumps power are 3 dBm, 4 dBm 9 dBm, 10 dBm, 3 dBm 和 4 dBm 时转换光信号的星座图. 可以看出, 图 8(c)、(d) 比图 8(a)、(b) 星座图差. 这是因为信号光功率远大于泵浦光功率时, 波长变换过程中发生更显著的 XPM 效应对转换光信号产生了更大的相位噪音.

图 8 为当信号光为 25 dBm, 泵浦光功率分别为

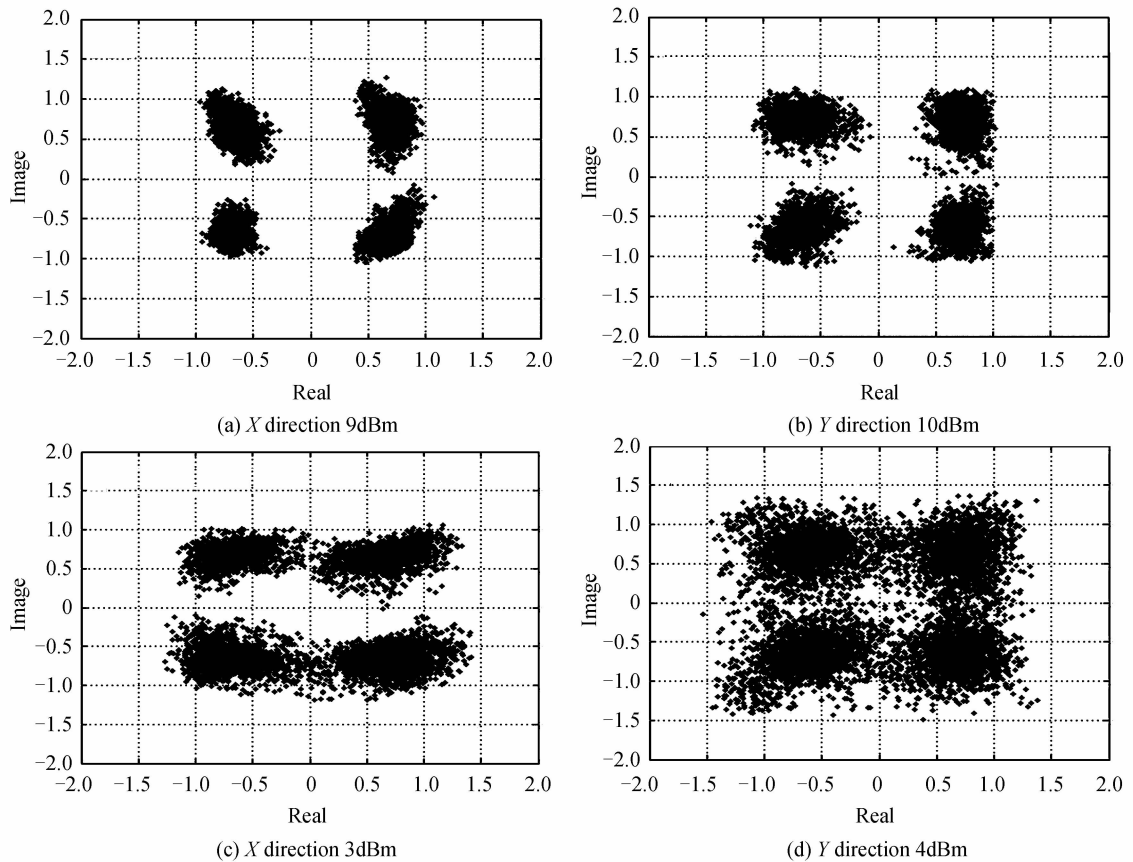


图 8 信号光功率为 25 dBm, 不同泵浦光功率下转换光的星座图

Fig. 8 Constellation figures of the converted signal at different pump power when signal power is 25 dBm

两个泵浦光功率分别为 9 dBm 和 10 dBm, 信号光分别为 0 dBm 和 5 dBm 时转换光信号的星座图见图 9. 从图 9 可以看出星座图很好. 这是因为泵浦光功率

远大于信号光功率时, 发生了显著的 FWM 效应, 没有 XPM 效应对转换光信号的相位噪音影响.

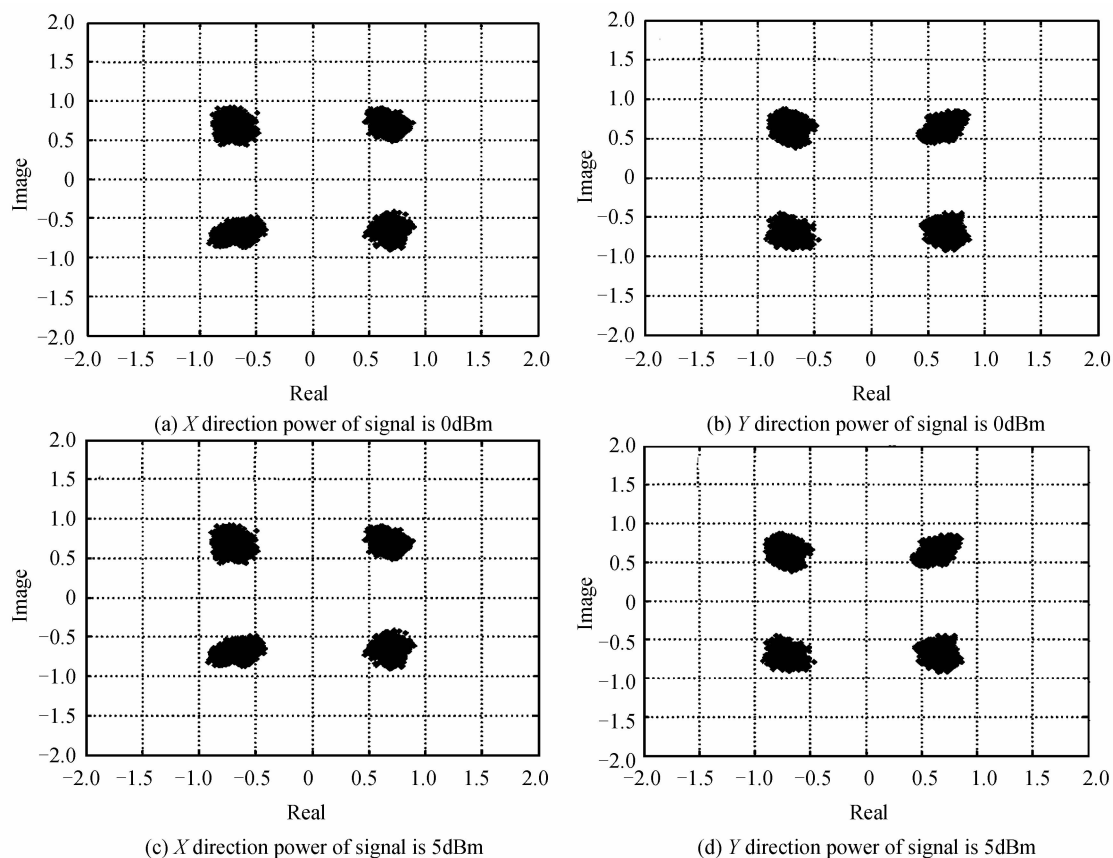


图9 两个泵浦光功率分别为9和10 dBm,信号光功率为0 dBm和5 dBm时转换光的星座图
Fig. 9 Constellation figures of the converted signal at signal power 0 dBm and 5 dBm when two pumps power are 9 dBm and 10 dBm, respectively

3 结论

本文从理论上研究了基于半导体光放大器垂直双泵浦结构对偏振复用 QPSK 信号的波长变换,采用数字相干检测实现了偏振复用信号的接收.研究发现当偏振复用信号中的一个信号与一个泵浦光之间的偏振夹角为 $\varphi = n\pi/2$ ($n=0,1,\dots$) 时,在接收端可以实现偏振复用 QPSK 信号的无串扰解调.通过仿真实现了 40 Gbit/s 偏振复用 QPSK 信号基于垂直双泵浦 SOA-FWM 系统的波长变换,验证了理论分析的正确性.分析了泵浦光与信号光之间的频率间距对系统转换效率和转换光信号质量的影响.还分析了波长变换中交叉相位调制效应对转换光信号质量的影响.

参考文献

[1] WAUTERS N, VAN Parys W, VAN Caenegem B, *et al.* Reduction of wavelength blocking through partitioning with wavelength converters [C]. Optical Fiber Communication (OFC), 1997, 122-193.
[2] GRIPP J, DUELK M, SIMSARIAN J, *et al.* Optical switch fabrics for ultra-high-capacity IP routers [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2003, **21**(11): 2839-2850.
[3] OBERMANN K, KINDT S, BREUER D, *et al.* Performance analysis of wavelength converters based on cross-gain modulation in semiconductor-optical amplifiers[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1998, **16**(1): 78-85.

[4] WANG Zi-nan, XU Yong-zhao, ZHANG Xia, *et al.* Wavelength conversion based on cross-phase modulation in microstructure fibers[J]. *Chinese Journal of Laser*, 2008, **35**(3): 414-417.
王子南, 徐永钊, 张霞, 等. 基于微结构光纤中交叉相位调制效应的波长变换[J]. *中国激光*, 2008, **35**(3): 414-417.
[5] MEHTA P, HEALY N, DAY T D, *et al.* Ultrafast wavelength conversion via cross-phase modulation in hydrogenated amorphous silicon optical fibers [J]. *Optics Express*, 2012, **20**(24): 26110-26116.
[6] UESAKA K, WONG K K Y, MARHIC M E, *et al.* Polarization-insensitive wavelength exchange in highly-nonlinear dispersion-shifted fiber [C]. Optical Fiber Communication(OFC), 2002, Anaheim, CA, ThY3.
[7] YU Jan-jun, JIA Zheng-sheng, YEO Y K, *et al.* Spectrally non-inverting wavelength conversion based on FWM in HNL-DSF and its application in label switching optical network[C]. European Conference on Optical Communication (ECOC), 2005, 32-35.
[8] GIAMPIERO C, LUCA B, MARCO P, *et al.* Investigation of transparency of FWM in SOA to advanced modulation formats involving intensity, phase, and polarization multiplexing[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2009, **27**(1): 4256-4261.
[9] LACEY J P R, SUMMERFIELD M A, MADDEN S J. Tunability of polarization insensitive wavelength converters based on four-wave mixing in semiconductor optical amplifiers [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1998, **16**(12): 2419-2427.
[10] DONG Ze, YU Jian-jun, CHIEN Hung-chang, *et al.*

- Wavelength conversion for 1.2 Tb/s optical OFDM superchannel based on four-wave mixing in HNLF with digital coherent detection [C]. European Conference on Optical Communication (ECOC), 2011, 1-3.
- [11] WANG Da-wei, CHENG Tee-hiang, YEO Yong-kee, *et al.* Optical wavelength multicasting based on four wave mixing in highly nonlinear fiber with reduced polarization sensitivity [C]. Optical Fiber Communication (OFC), 2010, JWA47.
- [12] LU Jia, DONG Ze, CAO Zi-zheng, *et al.* All-optical Wavelength conversion based on parallel dual-pump four-wave mixing in semiconductor optical amplifier for OFDM optical signal[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(11): 2857-2862.
卢嘉, 董泽, 曹子峥, 等. 基于半导体光放大器平行双抽运对 OFDM 光信号进行全光波长变换性能研究[J]. 光子学报 2009, **38**(11): 2857-2862.
- [13] RENAUDIER J, CHARLET G, BERTRAN-Pardo O, *et al.* Transmission of 100Gb/s Coherent PDM-QPSK over 16x100km of standard fiber with erbium amplifiers [J]. *Optics Express*, 2009, **17**(7): 5112-5119.
- [14] ZHOU Xiang, YU Jian-jun. Multi-level, multi-dimensional coding for high-speed and high-spectral-efficiency optical transmission[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2009, **27**(16): 3641-3653.
- [15] TANG Jin, CHEN Lin, XIAO Jiang-nan. Experiment on a polarization division multiplexed QPSK coherent optical digital communication system[J]. *Journal of Optoelectronics Laser*, 2012, **23**(10): 1895-1900.
唐进, 陈林, 肖江南. 偏振复用 QPSK 相干光数字通信系统实验研究[J]. 光电子. 激光, 2012, **23**(10): 1895-1900.
- [16] LU Jia, YU Jian-jun, ZHOU Hui, *et al.* Polarization insensitive wavelength conversion based on dual-pump four-wave mixing for polarization multiplexing signal in SOA[J]. *Optical Communication*, 2011, **284**(22): 5364-5371.
- [17] ASTAR W, LENIHAN A S, CARTER G M. Polarization-insensitive wavelength conversion by FWM in a highly nonlinear PCF of polarization-scrambled 10-Gb/s RZ-OOK and RZ-DPSK signals [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2007, **19**(20): 1676-1678.
- [18] HUANG Ming-fang, YU Jian-jun, CHANG Gee-kung. Demonstration of polarization insensitive wavelength conversion of 112-Gb/s polarization multiplexed RZ-QPSK signals using bismuth-oxide-based nonlinear optical fiber with high SBS threshold [C]. Optical Fiber Communication (OFC), 2010, OWP6.