

## QD-SOA 的四波混频及 DPSK 信号的异或逻辑研究

张丽梅<sup>1,2</sup>, 王 智<sup>1,2</sup>, 刘岚岚<sup>1,2</sup>, 孙振超<sup>1,2</sup>, 王 甫<sup>1,2</sup>, 刘英峰<sup>1,2</sup>

(1. 北京交通大学 理学院 光信息科学与技术研究所, 北京 100044;  
2. 发光与光信息技术教育部重点实验室, 北京 100044)

**摘 要:** 采用有限差分方法对量子点半导体光放大器(QD-SOA)中的四波混频(FWM)现象进行了研究。通过仿真计算,分析了多个参数对四波混频效率的影响。增强泵浦光功率、增大 QD-SOA 的长度以及注入电流,四波混频效率明显增大。增大探测光功率以及泵浦光和探测光的波长间隔,四波混频效率均降低。基于四波混频效应实现了差分相移键控信号的异或逻辑操作,模拟得到了异或逻辑的时域和频域输出结果。在多个波长位置同时实现了异或逻辑,并对 32 比特的序列异或操作进行了仿真研究,得到了异或逻辑的时序结果及眼图。

**关键词:** 量子点半导体光放大器; 四波混频; 异或逻辑; DPSK

**中图分类号:** O436 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)12-4072-06

## FWM and XOR logic for DPSK signals in QD-SOAs

Zhang Limei<sup>1,2</sup>, Wang Zhi<sup>1,2</sup>, Liu Lanlan<sup>1,2</sup>, Sun Zhenchao<sup>1,2</sup>, Wang Fu<sup>1,2</sup>, Liu Yingfeng<sup>1,2</sup>

(1. Institute of Optical Information, School of Science, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;  
2. Laboratory of Luminescence and Optical Information, Ministry of Education, Beijing 100044, China)

**Abstract:** The Four Wave Mixing(FWM) of the quantum dots semiconductor optical amplifiers(QD-SOA) was investigated by using the finite differential method based on the transitions between energy levels. The effects of the parameters on the efficiency of FWM were analyzed by simulation. The efficiency of FWM increased with the increase of the power of pump light, the length of QD-SOA and the injected current. The efficiency of FWM decreased with the increase of the power of the probe light and wavelength space. The exclusive-OR(XOR) logic of differential phase-shift keying signals was realized based on the FWM effect and the time domain and frequency domain results of the XOR logic were got by simulation. The XOR logics at position with different wavelengths were realized simultaneously. The XOR logic of 32-bit sequence was investigated and the XOR result and the eye diagram were achieved.

**Key words:** quantum dots-semiconductor optical amplifiers; FWM; XOR logic; DPSK

收稿日期:2014-04-07; 修订日期:2014-05-10

基金项目:国家自然科学基金(61077048);北京市自然科学基金(4132035);中央高校基本科研业务费专项资金(2012JBM103)

作者简介:张丽梅(1977-),女,博士生,讲师,主要从事光纤通信、集成光电子器件和全光信号处理方面的研究。Email: lmzhang@bjtu.edu.cn

导师简介:王智(1971-),男,教授,主要从事光纤通信、集成光电子器件和全光信号处理方面的研究。Email: zhiwang@bjtu.edu.cn

## 0 引言

量子点半导体光放大器(QD-SOA)具有高饱和输出功率、低噪声指数和载流子恢复快等特点,因而引起人们极大的关注和广泛研究。QD-SOA 对码型效应的抑制显示了其在高速信号处理中的应用前景<sup>[1-2]</sup>。基于 QD-SOA 的高速动态特性已经实现了高速光放大器,光开关,波长转换和超高速光逻辑门等<sup>[3-4]</sup>。

差分相移键控调制方式(DPSK)是近年来光纤通信系统传输格式中研究的一个热点<sup>[5-6]</sup>,很多研究机构开始对 DPSK 信号进行全光逻辑和波长转换的研究。Ning Deng 等<sup>[7]</sup>在半导体光放大器中实现了 RZ-DPSK 信号的异或逻辑, Jian Wang 等<sup>[8]</sup>利用高非线性光纤实现了 40 Gb/s NRZ-DPSK 信号的异或逻辑, Mohamed A. Ettabib 等<sup>[9]</sup>在硅锗波导中实现了 40 Gb PSK 信号的波长转换。从数字仿真和实验中都已经证明,使用 RZ/NRZ-DPSK 可以减小在 10 Gb/s 的 WDM 系统中信道间 XPM 效应造成的损伤。同传统的 OOK (ON-OFF keying) 调制方式相比, DPSK 调制方式具有更高的非线性容限,结合干涉仪解调和平衡探测可以提高接收机的灵敏度,因而受到了广泛的关注<sup>[10]</sup>。

## 1 QD-SOA 中的四波混频效应

### 1.1 QD-SOA 中的四波混频效应的理论模型

文中使用的器件是 InAs/GaAs QD-SOA,此 QD-SOA 有源区由生长在 GaAs 基底的 7 层 InAs 量子点构成,量子点的表面密度是  $5.0 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$ ,被厚度为 5 nm 的 InGaAs 覆盖。量子点导带有 3 个非简并的能级,价带有 8 个非简并的能级。导带第  $i$  个和第  $i+1$  个能级的能量差是 70 meV,价带第  $k$  个和第  $k+1$  个能级的能量差是 10 meV。InAs 量子点的基态辐射在 1.3  $\mu\text{m}$  附近。其具体能级结构和光子传输方程见参考文献[11],利用其光子速率方程和载流子速率方程可以得到光信号在 QD-SOA 中的传输结果。

QD-SOA 中的四波混频(FWM)是三阶非线性效应导致的,频率分别为  $\omega_1$ 、 $\omega_2$  和  $\omega_3$  的光信号同时输入 QD-SOA 中,在 QD-SOA 的输出端产生了新的频率成分,其频率为  $\omega_{\text{FWM}} = \omega_1 + \omega_2 - \omega_3$ 。产生四波混频过程的非线性过程主要包括带间和带内过程。带间

过程主要是由于受激辐射导致的载流子消耗,即通常所说的载流子密度波动(CDP)。带内效应主要同两个现象有关:光谱烧孔(SHB)和载流子加热(CH)。

新产生的四波混频信号的传输方程如下<sup>[12-13]</sup>:

$$\frac{\partial \mathbf{E}_{\text{FWM}}}{\partial t} + \frac{1}{v_g} \frac{\partial \mathbf{E}_{\text{FWM}}}{\partial t} = \frac{1}{2} [\mathbf{g} - i\Phi - \alpha] \mathbf{E} + i \frac{1}{2} \chi^{\text{FWM}} \mathbf{E}_1 \mathbf{E}_2 \mathbf{E}_3^* \quad (1)$$

式中:  $v_g$  为群速度;  $\mathbf{g}$  为增益系数;  $\Phi$  为相移系数;  $\alpha$  为损耗系数;  $\mathbf{E}_{\text{FWM}}$  为电场的慢变包络。公式(1)中,  $\chi^{\text{FWM}}$  是非线性磁化系数,表述了 FWM 过程对新产生信号的贡献,可以表达成 CDP、CH 和 SHB 这 3 个非线性过程的贡献之和,有:

$$i \chi^{\text{FWM}}(\Delta\omega) = -\sum_y \rho_y (1 - i\alpha_y) \mathbf{h}_y(\Delta\omega), \quad \mathbf{y} = \text{CDP}, \text{CH}, \text{SHB} \quad (2)$$

式中:  $\alpha_y$  为非线性过程  $\mathbf{y}$  导致的线宽增强因子;  $\rho_y$  描述了非线性过程  $\mathbf{y}$  导致的 FWM 的强度。各个非线性过程的频率响应部分  $\mathbf{h}_y \Delta\omega$  表达如下:

$$\begin{aligned} \mathbf{h}_{\text{CDP}}^{-1}(\Delta\omega) &= (1 - i\Delta\omega\tau_{\text{SHB}})(1 - i\Delta\omega\tau_{\text{CDP}}) \\ \mathbf{h}_{\text{CH}}^{-1}(\Delta\omega) &= 1 - i\Delta\omega\tau_{\text{SHB}}(1 - i\Delta\omega\tau_{\text{CH}}) \\ \mathbf{h}_{\text{SHB}}^{-1}(\Delta\omega) &= 1 - i\Delta\omega\tau_{\text{SHB}} \end{aligned} \quad (3)$$

式中: 时间常数  $\tau_{\text{CH}}$  和  $\tau_{\text{SHB}}$  分别表示载流子-光子和载流子-载流子散射时间。

公式(1)、(2)就是描述 FWM 过程的基本方程,由它们和光子传输方程、载流子速率方程即可模拟光信号经 QD-SOA 发生 FWM 的过程。首先,在稳态条件下解 QD-SOA 的速率方程,得到各能级载流子占用概率的初值。然后将 QD-SOA 的长度沿  $z$  方向分成  $M$  段,认为每一段中物理量和模式增益都为常数,利用有限差分方法(FDM)数值解速率方程,得到每一段末端的光子数密度,进而可得光子和载流子数密度在 QD-SOA 内的时间演化和纵向空间分布。

### 1.2 四波混频数值模拟结果及讨论

图 1(a)显示的是将两个连续光 CW1、CW2 同时输入 QD-SOA,二者在 QD-SOA 中发生四波混频效应后,输出信号的频谱。输入的两个连续光的频率间隔为 100 GHz, CW1 光的波长为 1 292.2 nm, CW2 光的波长为 1 291.6 nm,二者的输入功率均为 5 mW。从图中可以看出,除了输入的两个频率的光,在两侧又产生了新的频率成分。新产生的信号与输入信号之间满足  $\omega_1 + \omega_2 = \omega_3 + \omega_4$ 。

当 CW1 为泵浦光, CW2 为探测光时所得的结果如图 1(b)所示。CW1 的输入功率为 10 mW, CW2 的输入功率为 0.5 mW。从图中可以看到,新产生的光 3 强度明显低于探测光的强度,光 4 的强度更低。笔者定义 FWM 的效率  $\eta = P_{\text{FWM}}/P_{\text{probe}}$ 。此时 FWM 效率  $\eta = 48.2\%$ 。模拟时放大器的基本参数参考文献[11-13]。

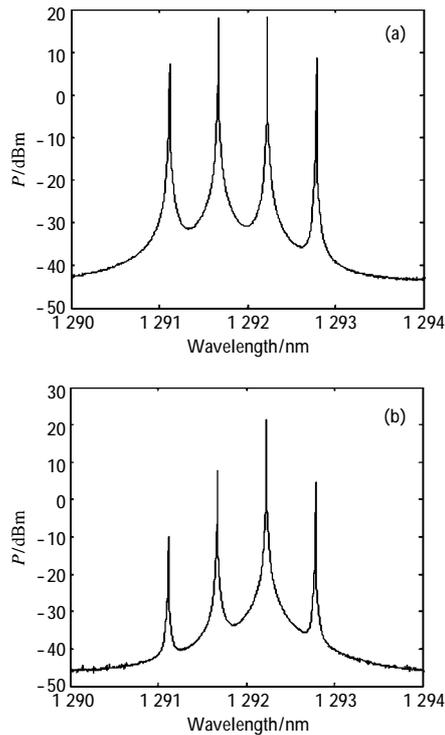


图 1 两个连续光的 FWM 过程(a)输入功率相同,(b)输入功率不同  
Fig.1 FWM results of two continuous waves with the same input power (a)and the different input power(b)

下面分别研究泵浦光功率、探测光功率、输入光波长间隔、QD-SOA 长度、QD-SOA 注入电流等参数对 FWM 效率的影响。模拟时每次只改变一个参数,其他参数保持不变。模拟结果如图 2 所示。图 2(a)显示的是 FWM 效率随输入泵浦光功率的变化情况。图中两条曲线分别对应探测光功率为 0.5 mW 和 2 mW 两种情况。图 2(b)显示的是 FWM 效率随输入探测光功率的变化情况。图中两条曲线分别对应泵浦光功率为 10 mW 和 5 mW 两种情况。随着泵浦光功率的增大,FWM 效率明显增大,甚至出现了超过 100%的情况。随着探测光功率的增大,FWM 效率逐渐降低,但降低的幅度并不大。图 2(c)、(d)、(e)分别显示的是 FWM 效率随输入光波长间隔、SOA 长度以及 SOA 注入电流的变化情况。每个图中的两条曲

线分别对应不同的输入泵浦光功率。当泵浦光和探测光的波长间隔增大,FWM 效率逐渐降低。增大 QD-SOA 的长度,FWM 效率明显增大。随着注入电流的增加,FWM 效率增大。当输入泵浦光功率较大时,FWM 效率随注入电流的变化更加明显。

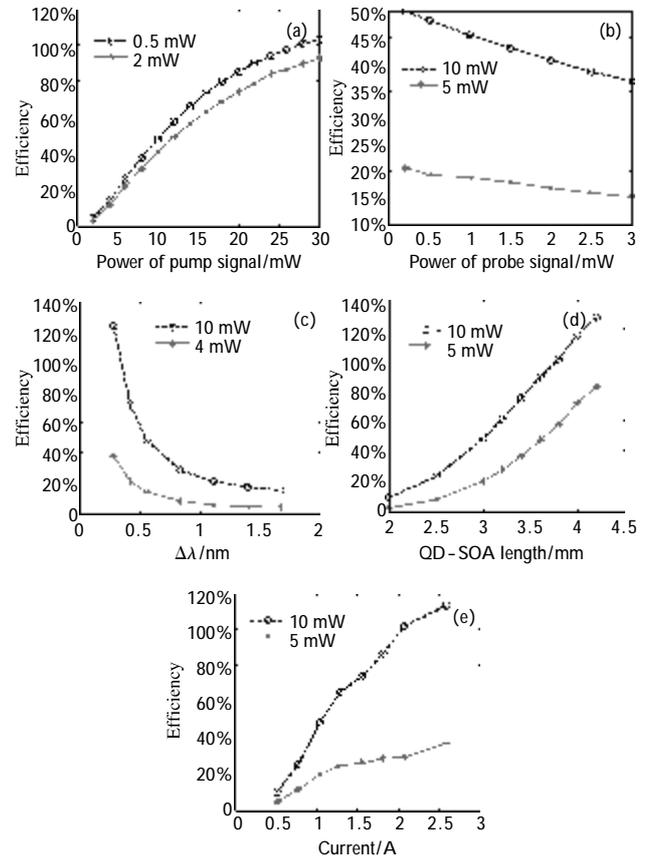


图 2 FWM 效率随输入泵浦光功率(a)、探测光功率(b)、输入光波长间隔(c)、QD-SOA 长度(d)及 QD-SOA 注入电流(e)的变化  
Fig.2 Dependence of FWM efficiency on input pump power (a); input probe power (b); wavelength space (c); length of QD-SOA (d)and injected current (e)

## 2 基于四波混频效应的 DPSK 信号的异或逻辑

### 2.1 DPSK 信号实现异或逻辑的操作原则

图 3 为 QD-SOA 中基于四波混频效应实现 XOR 逻辑的示意图。两个输入信号 A、B 均为 DPSK 信号,其相位  $\Phi_1$  与  $\Phi_2$  为 0 或  $\pi$ 。信号  $A(\omega_1)$ 、信号  $B(\omega_2)$  和一个泵浦信号  $C(\omega_3)$  同时注入 QD-SOA 中,由于三阶非线性效应导致 QD-SOA 的输出端有新的频率成分产生,这就是四波混频信号。根据能量守恒,新产生的信号的频率满足  $\omega_{\text{FWM}} = \omega_1 + \omega_2 - \omega_3$ 。根据

四波混频过程的原理, 新产生信号的相位同输入信号相位之间的关系为  $\Phi_{FWM} = \Phi_1 + \Phi_2 - \Phi_3$ 。这里, 取泵浦光为连续光, 因此泵浦光的相位  $\Phi_3$  是常数。因此, 对新产生的四波混频信号, 其相邻两个比特的相位差可以表示为:  $\Delta\Phi_{FWM} = \Delta\Phi_1 + \Delta\Phi_2$ 。其中,  $\Delta\Phi_1$  和  $\Delta\Phi_2$  分别为信号 A 和信号 B 的相邻两个比特的相位差。根据 DPSK 信号的特点, 相位差  $\Delta\Phi_1$  和  $\Delta\Phi_2$  只能为 0 或  $\pi$ ,  $\Delta\Phi = 0, \Delta\Phi = \pi$  对应于比特“0”, “1”。对于不同的比特序列, 即对于不同的  $\Delta\Phi_1$  与  $\Delta\Phi_2$ , 其逻辑结果如表 1 所示。从表中可以看出, 当信号 A 和信号 B 相同时, 四波混频过程所新产生的信号为 0, 当信号 A 和信号 B 不同时, 新产生的信号为 1, 因此新产生的信号即为两个 DPSK 信号 A 和 B 的逻辑“异或”。

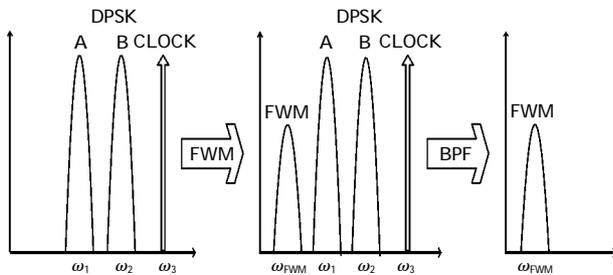


图 3 利用 FWM 实现 XOR 逻辑示意图

Fig.3 Schematic diagram of XOR logic with the FWM process

表 1 DPSK 信号实现 XOR 逻辑的真值表

Tab.1 True value of XOR logic

Input	Input	Output
$\Delta\Phi_1$	$\Delta\Phi_2$	$\Delta\Phi_{FWM}$
0	0	0
0	$\pi$	$\pi$
$\pi$	0	$\pi$
$\pi$	$\pi$	0

### 2.2 DPSK 信号实现异或逻辑模拟结果及讨论

两个 RZ-DPSK 信号 A、B(A: 1001, B: 0101) 以及一个时钟信号 C 同时输入 QD-SOA 中。信号 A、B 的频率间隔为 500 GHz, 信号 A、B、C 的峰值功率均为 2 mW, 1/e 脉冲宽度为 4 ps。输入信号 A 和 B 的时域波形和相位如图 4(a)、(b) 所示。这 3 个信号在 QD-SOA 中发生非简并四波混频效应, 将产生出新的 FWM 信号, 新产生的 FWM 信号也是 RZ-DPSK 信号, 其时域波形与星座图如图 4(c)、(d) 所示。

图 5 显示的是输出信号的频谱。模拟时, 信号 A 的波长为 1 292.2 nm, 信号 B 的波长为 1 289.5 nm,

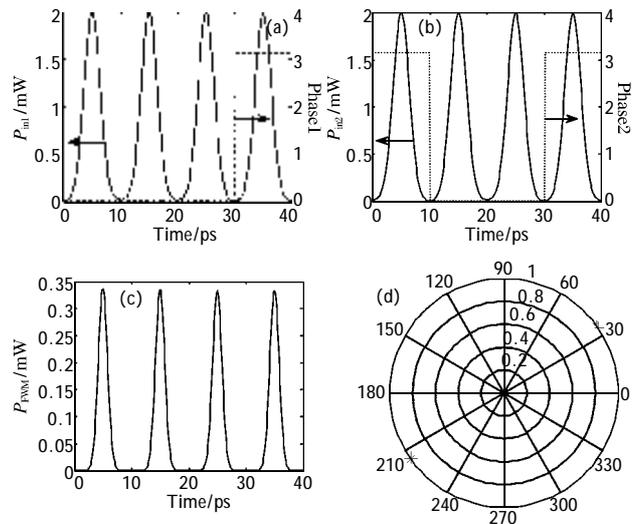


图 4 (a)、(b)为输入信号 A、B 的波形和相位, (c)为输出信号波形, (d)为输出信号星座图

Fig.4 Waveform and phase of the input signal A and B (a), (b); waveform of output signal (c) and constellation of output signal (d)

时钟信号 C 的波长为 1 286.7 nm。从图中可以看出, 在波长为 1 295.0 nm 处新产生了一个 FWM 信号, 其频率满足  $w_4 = w_1 + w_2 - w_3$ 。将 FWM 信号经延迟干涉仪解调, 并经平衡检测机检测后所得的信号同输入信号 A、B 进行对比, 如图 6 所示。可见, 此 FWM 信号

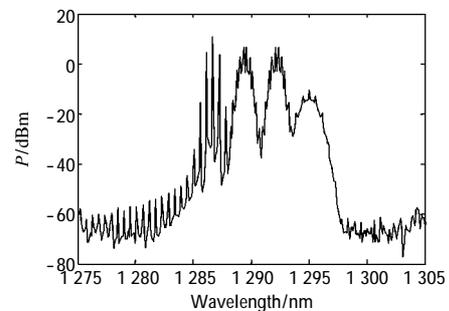


图 5 输出信号频谱

Fig.5 Spectrum of output signal

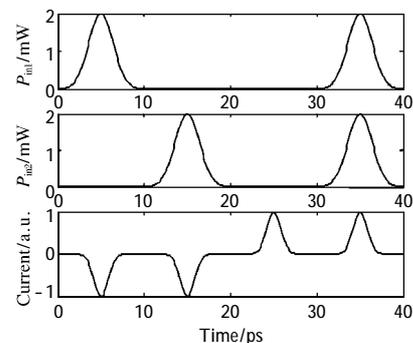


图 6 XOR 逻辑模拟结果

Fig.6 Simulation result of XOR logic

正是输入信号 A 与 B 的 XOR 逻辑结果。结果显示,同输入信号相比,输出 XOR 逻辑的脉冲宽度变窄。

### 2.3 多个 XOR 逻辑同时实现

如图 7 所示,输入信号仍为两个 RZ-DPSK 信号 A、B 以及一个时钟信号 C,但三者的频率间隔不同。 $\omega_2 - \omega_1 = 500 \text{ GHz}$ ,  $\omega_3 - \omega_2 = 1000 \text{ GHz}$ 。这 3 个信号在 QD-SOA 中发生 FWM 效应,将分别在  $\omega_4 = \omega_1 + \omega_2 - \omega_3$ ,  $\omega_5 = \omega_1 + \omega_3 - \omega_2$ ,  $\omega_6 = \omega_2 + \omega_3 - \omega_1$  处出现 FWM 信号。根据前面的相位分析可知,这些 FWM 信号都是信号 A 与 B 的逻辑 XOR 结果。图 8 是输出信号的频谱,从图中可以看出,除了输入的 3 个波长的信号,又产生出了 3 个强度较弱的频率成分。

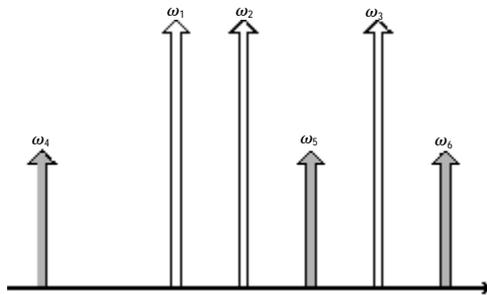


图 7 同时实现多个 XOR 逻辑示意图

Fig.7 Schematic diagram of XOR logic with multi-wavelength

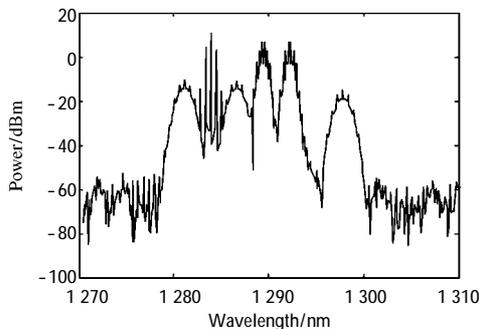
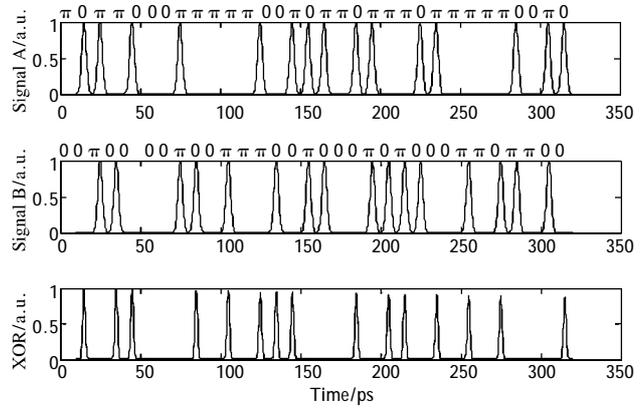


图 8 输出信号频谱

Fig.8 Spectrum of output signals

DPSK 信号实现 XOR 逻辑结果如图 9 所示。模拟时输入信号 A、B 为 32 比特 RZ-DPSK 信号,信号 C 为时钟信号,速率均为 100 Gbps。信号 A、B、C 的峰值功率均为 2 mW,1/e 脉冲宽度为 4 ps,信噪比和消光比均为 20 dB。图 9 (a) 给出的是信号 A、B 及 FWM 信号经解调后,各反向输出端的输出信号。从图中可以看出,FWM 信号实现了信号 A 与 B 的 XOR 逻辑。图中给出的是频率为  $\omega_4$  的信号的解调结果,频率为  $\omega_5$  和  $\omega_6$  处的信号结果与之类似。图 9(b)

和(c)是输出信号的相位和眼图。输出信号的 Q 因子为 22。



(a)

(b)

(c)

图 9 (a) 为 32 比特 XOR 结果,(b)为输出信号星座图,(c)为眼图  
Fig.9 XOR logic of 32-bit sequence (a); constellation of output signal (b) and eye-diagram(c)

### 3 结论

从导带、价带和浸润层的能级跃迁出发,采用分段模型对 QD-SOA 中的四波混频现象进行数值研究。通过仿真计算,分析了多个参数对四波混频效率的影响。增大 QD-SOA 的注入电流、增强泵浦光功率以及增大 QD-SOA 的长度,FWM 效率明显增大,甚至可以超过 100%。增大探测光功率以及增大泵浦光和探测光的波长间隔,FWM 效率均降低。基于 FWM 效应实现了 DPSK 信号的逻辑异或操作,模拟得到了异或逻辑的时域和频域输出结果。在 3 个不同波长位置同时实现了异或逻辑操作,并对 32 比特的序列的异或操作进行了仿真研究,得到了异或输出结果以及输出信号的星座图和眼图,计算得到输出信号的 Q 因子为 22。

### 参考文献:

- [1] Akiyama T, Hatori N, Nakata Y. Pattern-effect-free semi-

- conductor optical amplifier achieved using quantum dots [J]. *Electron Letter*, 2002, 38(19): 1139-1140.
- [2] Uskov V, Reilly E P O, Manning R J. On ultrafast optical switching based on quantum-dot semiconductor optical amplifier in nonlinear interferometers [J]. *IEEE Photonics Technology Letter*, 2004, 16(5): 1265-1267.
- [3] Stylianos Sygletos, Rene Bonk. Filter assisted wavelength conversion with quantum-dot SOAs [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2010, 28(6): 882-897.
- [4] Contestabile G, Maruta A. Regenerative amplification by using self-phase modulation in a quantum-dot SOA [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2010, 22(7): 492-494.
- [5] Ying Xiangyue, Xu Tiefeng, Liu Taijun, et al. New method for generation of RZ/CSRZ-DQPSK signals based on MZM [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(3): 755-758. (in Chinese)  
应祥岳, 徐铁峰, 刘太君, 等. 基于 MZM 的 RZ/CSRZ-DQPSK 信号产生的新方法 [J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(3): 755-758.
- [6] Shao Yufeng, Zhang Junwen, Huang Bo, et al. 100Gbit/s transmission performance of serial staggered phase-shift keying modulation formats signal [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(3): 464-468. (in Chinese)  
邵宇丰, 张俊文, 黄博, 等. 100 Gbit/s 级联交错相位调制码型信号的传输性能 [J]. *红外与激光工程*. 2010, 39(3): 464-468.
- [7] Ning Deng, Kit Chan, Chun-Kit Chan, et al. An all-optical XOR logic gate for high-speed RZ-DPSK signals by FWM in semiconductor optical amplifier [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2006, 12(4): 702-707.
- [8] Wang Jian, Sun Qizhen, Sun Junqiang, et al. Experimental demonstration on 40 Gbit/s all-optical multicasting logic XOR gate for NRZ-DPSK signals using four-wave mixing in highly nonlinear fiber [J]. *Optics Communications*, 2009, 282: 2615-2619.
- [9] Mohamed A Ettabib, Kamal Hammani, Francesca Parmigiani, et al. FWM-based wavelength conversion of 40 G baud PSK signals in a silicon germanium waveguide [J]. *Optics Express*, 2013, 21(14): 16683-16689.
- [10] Gnauck A H, Winzer P J. Optical phase-shift-keyed transmission [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2005, 23(1): 115-130.
- [11] Hussein Taleb, Kambiz Abedi, Saeed Golmohammadi. Operation of quantum-dot semiconductor optical amplifiers under nonuniform current injection [J]. *Applied Optics*, 2011, 50(5): 608-617.
- [12] Stefan Diez, Carsten Schmidt, Reinhold Ludwig, et al. Four-wave mixing in semiconductor optical amplifiers for frequency conversion and fast optical switching [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 1997, 3(5): 1131-1145.
- [13] Hodeok Jang, Sub Hur, Yonghoon Kim, et al. Theoretical investigation of optical wavelength conversion techniques for DPSK modulation formats using FWM in SOAs and frequency comb in 10 Gb/s transmission systems [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2005, 23(9): 2638-2646.