

# 量子点半导体光放大器的波长转换效率

杨文华<sup>1</sup>, 王海龙<sup>1</sup>, 王兆翔<sup>1</sup>, 韦志禄<sup>1</sup>, 龚 谦<sup>2</sup>

<sup>1</sup>曲阜师范大学物理工程学院山东省激光偏光与信息技术重点实验室, 山东 曲阜 273165;

<sup>2</sup>中国科学院上海微系统与信息技术研究所信息功能材料国家重点实验室, 上海 200050

**摘要** 为提高全光波长转换器的波长转换效率,在量子点半导体光放大器(QD-SOA)波长转换特性研究的基础上,分别对基于交叉增益调制(XGM)效应和交叉相位调制(XPM)效应的全光波长转换器的转换效率进行了仿真分析。利用三能级 QD-SOA 模型并基于 XGM 型全光波长转换器,计算了输入脉冲宽度、有源区长度、损耗系数、最大增益模式和电子跃迁时间的变化对转换效率的影响。结果表明,减小输入脉冲宽度、损耗系数、电子跃迁时间和增加有源区长度、最大增益模式均可以提高全光波长转换器的转换效率。该研究对全光逻辑异或门的设计及 QD-SOA 的应用有一定的指导意义。

**关键词** 光纤光学; 量子点半导体光放大器; 交叉增益调制; 交叉相位调制; 转换效率; 异或门

**中图分类号** TN929.11 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/AOS201737.0406005

## Wavelength Conversion Efficiency of Quantum Dot Semiconductor Optical Amplifier

Yang Wenhua<sup>1</sup>, Wang Hailong<sup>1</sup>, Wang Zhaoxiang<sup>1</sup>, Wei Zhilu<sup>1</sup>, Gong Qian<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Shandong Provincial Key Laboratory of Laser Polarization and Information Technology,

College of Physics and Engineering, Qufu Normal University, Qufu, Shandong 273165, China;

<sup>2</sup>State Key Laboratory of Functional Materials for Informatics, Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China

**Abstract** In order to improve the wavelength conversion efficiency of all-optical wavelength converter, the conversion efficiency of all-optical wavelength converter based on the cross-gain modulation (XGM) effect and the cross-phase modulation (XPM) effect is analyzed on the basis of the research of wavelength conversion characteristics of quantum dot semiconductor optical amplifier (QD-SOA). Based on the XGM type all-optical wavelength converter and the three-level QD-SOA model, the effects of input pulse width, active region length, loss coefficient, maximum gain mode and electron transition time on conversion efficiency are calculated. The results show that reducing the input pulse width, loss coefficient and electron transition time and increasing the active region length and the maximum gain mode can improve the conversion efficiency of all-optical wavelength converter. The study is useful for the design of all-optical logic XOR gate and the application of QD-SOA.

**Key words** fiber optics; quantum dot semiconductor optical amplifier; cross-gain modulation; cross-phase modulation; conversion efficiency; XOR gate

**OCIS codes** 060.1155; 060.2330; 060.4510; 060.2310

## 1 引 言

光通信技术的发展对传输速度的要求越来越高。目前在光纤通信网络中,光电光型波长转换器在功耗、

**收稿日期:** 2016-10-19; **收到修改稿日期:** 2016-12-23

**基金项目:** 国家自然科学基金(61674096)、山东省自然科学基金(ZR2014FM011)、信息功能材料国家重点实验室开放课题(SK1201307)

**作者简介:** 杨文华(1990—),女,硕士研究生,主要从事光通信和光组网等方面的研究。E-mail: 15053762991@163.com

**导师简介:** 王海龙(1971—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事光通信和半导体光电子学等方面的研究。

E-mail: hlwang@mail.qfnu.edu.cn(通信联系人)

体积和日益显现的电子瓶颈等方面都难以适应不断发展的高速、大容量要求。全光波长转换器是在光的频域内实现信息在波长之间的切换,能够满足全光通信的要求,具有广阔的发展前景。

全光波长转换技术可提高波长利用率、降低网络阻塞率,是未来光纤通信及扩展网络通信容量的关键技术<sup>[1-3]</sup>。近几年,随着对半导体光放大器(SOA)科研投入的增加,SOA研究取得了很大的进展,同时基于SOA的波长转换技术也得以迅猛发展。基于SOA的波长转换技术具有响应快速、宽光谱、低功率损耗、低偏振相关性、较大的输入功率动态范围以及高输出光信噪比等优点。但是,随着不断增长的通信容量需求,传统的SOA由于载流子恢复慢、容易造成码型效应等,因此很难应用于快速的光信号处理过程中。与传统半导体光放大器(bulk-SOA)和量子阱半导体光放大器(QW-SOA)相比,量子点半导体光放大器(QD-SOA)具有阈值电流低、微分增益高和温度灵敏性低等特点,应用前景广阔<sup>[4-6]</sup>。

在实现全光波长转换方面,基于交叉增益调制(XGM)效应的波长转换技术容易实现,而基于QD-SOA的交叉增益调制效应的波长转换器一直是研究的重点。基于交叉相位调制(XPM)效应的波长转换器的制作工艺比较复杂,但转换光信号的消光比大、啁啾小且Q因子特性良好<sup>[7-9]</sup>。转换效率是衡量波长转换器的重要性能指标,并决定着输入功率和输出功率的可变化范围。如果转换效率过低,转换信号的信噪比就很低,则需要对转换后的信号进行放大。目前对QD-SOA的转换效率问题的详细分析研究还较少,文献<sup>[6-9]</sup>研究了波长转换器的增益、Q因子、消光比和啁啾特性等。本文进一步分析了基于XGM型和XPM型波长转换器的转换效率以及基于XPM效应逻辑异或门中转换信号的转换效率,并给出了数值计算的结果。

## 2 理论模型

### 2.1 QD-SOA 模型

在QD-SOA中,三能级速率方程能够充分描述浸润层载流子浓度的变化和激发态、基态内载流子的占有几率的变化<sup>[10-12]</sup>,能级结构如图1所示。

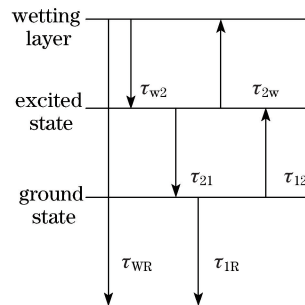


图1 QD-SOA的能级结构

Fig. 1 Energy level structure of QD-SOA

QD-SOA中,电子在浸润层、基态和激发态中的跃迁速率方程可表示为<sup>[13]</sup>

$$\frac{\partial N_w}{\partial t} = \frac{J}{eL_w} - \frac{N_w(1-h)}{\tau_{w2}} + \frac{N_Q h}{L_w \tau_{2w}} - \frac{N_w}{\tau_{wR}}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{N_w L_w (1-h)}{N_Q \tau_{w2}} - \frac{h}{\tau_{2w}} - \frac{h(1-f)}{\tau_{21}} + \frac{f(1-h)}{\tau_{12}}, \quad (2)$$

$$\frac{\partial f}{\partial t} = \frac{h(1-f)}{\tau_{21}} - \frac{f(1-h)}{\tau_{12}} - \frac{f^2}{\tau_{1R}} - \sum_i \frac{L_w g_i(\omega_i) P}{N_Q \sigma h_1 \omega_i}, \quad (3)$$

式中  $N_w$  为浸润层中载流子的浓度,  $h$  为电子在激发态的占有几率,  $f$  为电子在基态的占有几率,  $L_w$  为有源区的厚度,  $N_Q$  为量子点面密度,  $\tau_{w2}$  为电子从浸润层到激发态的弛豫时间,  $\tau_{2w}$  为电子从激发态到浸润层的弛豫时间,  $\tau_{12}$  为电子从基态到激发态的跃迁时间,  $\tau_{21}$  为电子从激发态到基态的跃迁时间,  $\tau_{wR}$  为电子在浸润层的自发辐射时间,  $\tau_{1R}$  为电子在量子点的自发辐射时间,  $h_1 \omega_i$  为光子能量,  $\omega_i$  为光的频率,  $J$  为注入电流密度,  $e$  为电子电量,  $\sigma$  为有源层横截面积,  $g_i(\omega_i)$  为第  $i$  段的模式增益,  $h_1$  为电子在激发态的占有

几率初始值,  $P$  为输出光功率。

光在 QD-SOA 中传播的光场方程为<sup>[14]</sup>

$$\frac{dE^+}{dz} = \Gamma[g(1 - j\eta) - \alpha]E^+, \quad (4)$$

$$\frac{dE^-}{dz} = -\Gamma[g(1 - j\eta) - \alpha]E^-, \quad (5)$$

式中  $Z$  为光场传输方向,  $E$  为输入光的电场强度,  $E^+$  为沿  $Z$  正方向传播的电场强度,  $E^-$  为沿与  $Z$  反方向传播的电场强度,  $\Gamma$  为光场限制因子,  $\alpha$  为光在波导中传输的损耗系数,  $\eta$  为线宽增强因子,  $g$  为材料增益系数。

光场方程的边界条件为

$$E^+(0) = (1 - r_1)E_{in} + r_1E^-(0), \quad (6)$$

$$E^-(L) = r_2E^+(L), \quad (7)$$

式中  $E^+(0)$  为输入端端面右侧正向传播的电场强度,  $E^-(L)$  为输出端端面左侧反向传播的电场强度,  $E^-(0)$  为输入端端面右侧反向传播的电场强度,  $E^+(L)$  为输出端端面左侧正向传播的电场强度,  $r_1$ 、 $r_2$  分别为前端和后端的反射系数。

### 2.2 工作原理

基于 XGM 效应的 QD-SOA 结构简单、实现容易、转换效率高且输入功率动态范围大, 其结构示意图如图 2 所示<sup>[15-17]</sup>。抽运光是带有调制信息且波长为  $\lambda_{pump}$  的信号光, 探测光是波长为  $\lambda_{probe}$  的连续直流光, 二者一起耦合进入 QD-SOA。由于光信号的放大会消耗 QD-SOA 中的载流子, 引起增益调制, 并且注入光功率的增大会伴随着增益的减小, 到达一定值时增益发生饱和; 增益的饱和导致抽运光的反向调制作用, 因此对连续的探测光的调制也是反向的, 这样探测光波长就会复制抽运光波长携带的调制信息, 即转换波长之间的调制信息; 转换后的输出信号与输入信号反相。

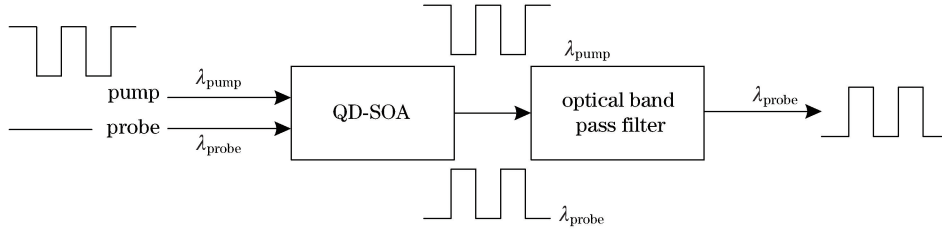


图 2 基于 XGM 效应的 QD-SOA 的波长转换原理图

Fig. 2 Schematic of wavelength conversion of QD-SOA based on XGM effect

基于 XPM 效应的 QD-SOA 尽管有多种结构形式, 但是其原理基本相同。图 3 为基于马赫-曾德尔干涉仪的 XPM 型全光波长转换器的结构示意图。信号光通过调制 QD-SOA 有源区中的折射率<sup>[18]</sup>, 进而调制另一束光(探测光)的相位, 这就是 XPM 波长转换原理; 然后利用光的干涉原理将相位调制转变为强度调制, 最终将原信号光上携带的信息复制到探测光上。因此信号光  $\lambda_1$  上的调制信号被有效复制到探测光  $\lambda_2$  上, 波长转换得以实现。输出的变换信号可以与原信号同相, 也可以反相, 这取决于工作点所在干涉仪传输曲线上斜率的正负<sup>[10]</sup>。

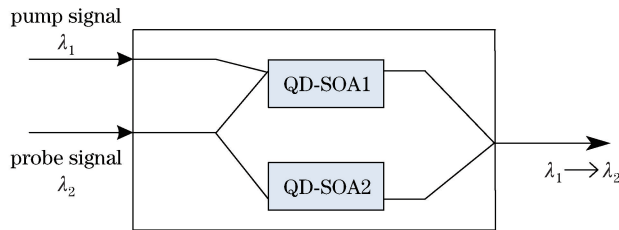


图 3 基于马赫-曾德尔干涉仪的 XPM 型全光波长转换器的结构示意图

Fig. 3 Structural schematic of XPM type all-optical wavelength converter based on Mach-Zehnder interferometer

图 4、5 分别为基于 XPM 效应的波长转换器的输入、输出信号, 输入的抽运光波长为 1500 nm, 输入的探

测光波长为 1550 nm, 设定 QD-SOA1 的注入电流为 40 mA, QD-SOA2 的注入电流为 35 mA, 则可实现同相转换, 即输出转换光与输入抽运光同相。

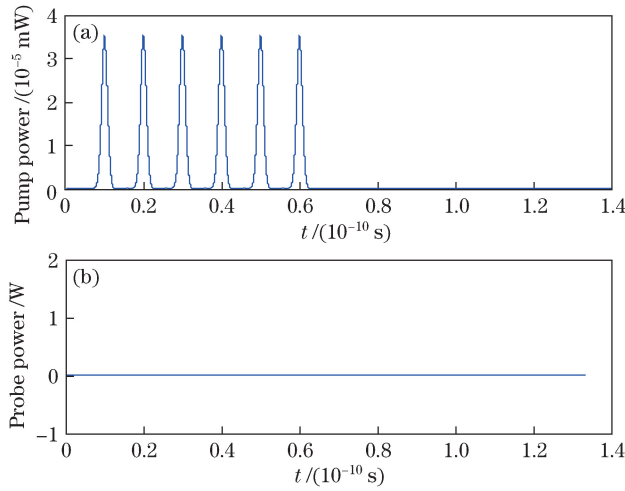


图 4 基于 XPM 效应的波长转换器的输入信号。(a) 抽运光; (b) 探测光

Fig. 4 Input signals of wavelength converter based on XPM effect. (a) Pump light; (b) probe light

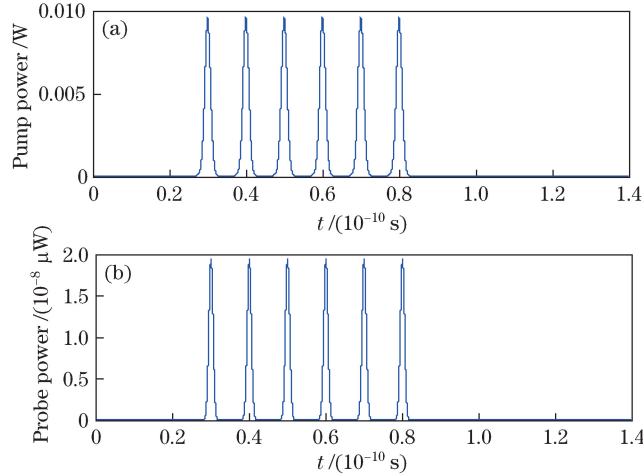


图 5 基于 XPM 效应的波长转换器的输出信号。(a) 抽运光; (b) 转换光

Fig. 5 Output signals of wavelength converter based on XPM effect. (a) Pump light; (b) converted light

### 3 数值运算

转换效率是衡量波长转换器的重要性能指标, 并决定着输入功率和输出功率的可变化范围。如果转换效率过低, 转换信号的信噪比就很低, 则需要对转换后的信号进行放大<sup>[12]</sup>。将转换后输出探测光的平均功率与输入抽运光的平均功率的比值定义为转换效率, 即

$$\eta = \frac{\langle P_{\text{out}} \rangle}{\langle P_{\text{pin}} \rangle}, \quad (8)$$

式中  $\langle P_{\text{out}} \rangle$  为输出探测光的平均功率,  $\langle P_{\text{pin}} \rangle$  为输入抽运光的平均功率。

基于 XGM 型和 XPM 型全光波长转换器, 仿真分析了输入脉冲宽度、有源区长度、损耗系数、最大增益模式和电子跃迁时间对转换效率的影响以及在全光逻辑异或门中各参量对转换光转换效率的影响。

#### 3.1 基于 XGM 型波长转换器转换效率的影响因素

图 6 为不同脉冲宽度下 XGM 型波长转换器的转换效率随时间的变化。可以看出, 脉冲宽度越小, 转换效率恢复越快, 恢复时间就越短。出现这种现象的原因在于: 在相同的单脉冲能量下, 脉冲宽度越小, 量子点中的载流子密度变化越快, 转换效率就越高, 因而转换效率恢复越快, 恢复时间就越短。

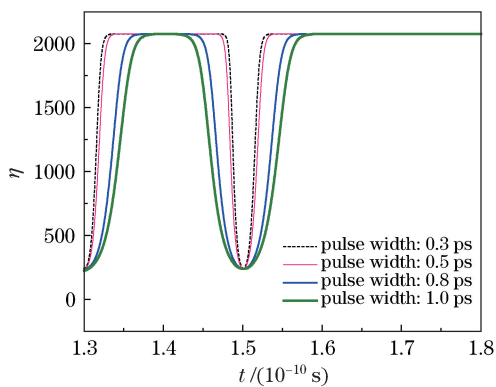


图 6 XGM 型波长转换器的转换效率随时间的变化

Fig. 6 Variation in conversion efficiency of XGM type wavelength converter with time

图 7 为 XGM 型波长转换器的最大增益模式  $g_{\max}$  与转换效率的关系。随着最大增益模式的增大,转换效率提高。 $g_{\max}$  直接影响着模式增益,模式增益越大,载流子浓度变化越快,转换效率就越高,所以经过模拟仿真得到的最大增益模式  $g_{\max}$  与转换效率成正比。

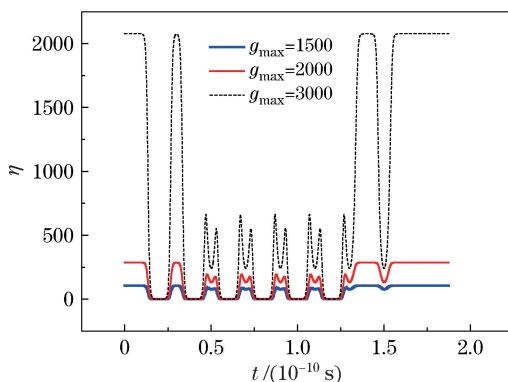


图 7 XGM 型波长转换器的转换效率与  $g_{\max}$  的关系

Fig. 7 Relationship between conversion efficiency and  $g_{\max}$  of XGM wavelength converter

图 8 进一步分析了激发态到基态的跃迁时间  $t_{21}$  对波长转换效率的影响。随着  $t_{21}$  的增大,转换效率降低。出现这种现象的原因在于:随着激发态到基态的跃迁时间的增大,基态消耗的载流子数目难以得到补充,导致载流子浓度减小,载流子浓度变化减小,转换效率就降低。

图 9、10 分别为有源区长度  $L$  和损耗系数  $\alpha_1$  与 XGM 型波长转换器的转换效率的关系。如图 9 所示,转换效率与有源区长度成正比,有源区长度越大,输入信号越容易得到放大,则 QD-SOA 产生的光增益就越大,使得探测光放大倍数增加,因此转换效率也随之提高。如图 10 所示,转换效率与损耗系数成反比,转换

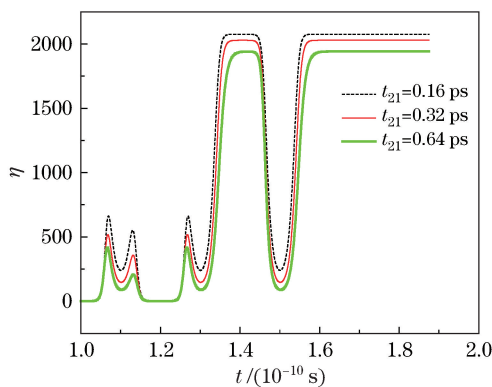


图 8 XGM 型波长转换器的转换效率与  $t_{21}$  的关系

Fig. 8 Relationship between conversion efficiency and  $t_{21}$  of XGM wavelength converter

效率随着损耗系数的增大而降低。

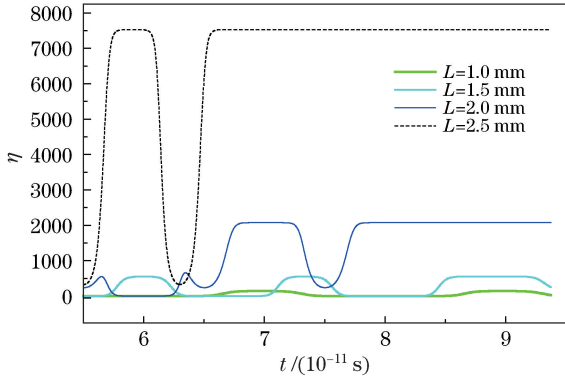


图 9 XGM 型波长转换器的转换效率与  $L$  的关系

Fig. 9 Relationship between conversion efficiency and  $L$  of XGM type wavelength converter

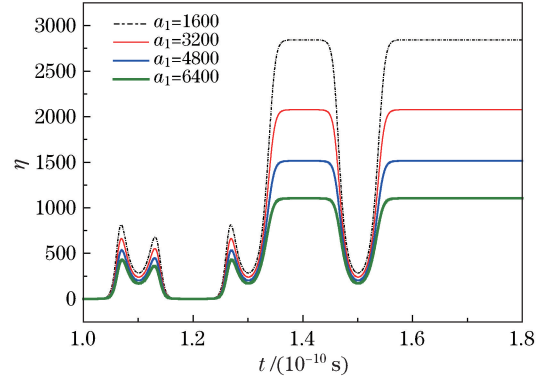


图 10 XGM 型波长转换器的转换效率与  $a_1$  的关系

Fig. 10 Relationship between conversion efficiency and  $a_1$  of XGM type wavelength converter

### 3.2 基于 XPM 型波长转换器及逻辑异或门转换光转换效率的影响因素

图 11、12 分别为 XPM 型波长转换器的转换效率和 XPM 型逻辑异或门转换光的转换效率与  $t_{21}$  的关系<sup>[19]</sup>。探测光的转换效率随着激发态到基态的跃迁时间的增加而呈现降低的趋势。在 XPM 型逻辑异或门得到同样的验证,  $t_{21}$  越小, 转换效率就越高。随着激发态到基态的跃迁时间的增加, 基态的载流子数目得不到及时补充, 载流子浓度降低, 有源区载流子发生受激辐射的几率也较小, 载流子浓度的变化减小, 所以折射率变化减小, 使得输出信号光的转换效率降低。

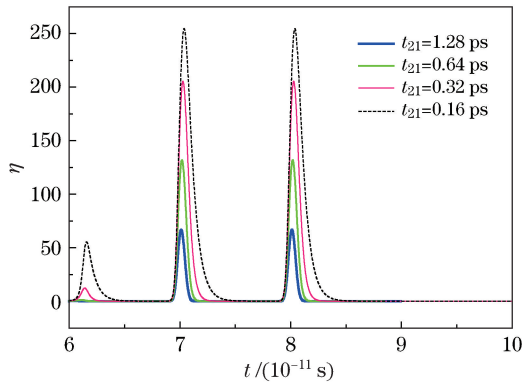


图 11 XPM 型波长转换器的转换效率与  $t_{21}$  的关系

Fig. 11 Relationship between conversion efficiency and  $t_{21}$  of XPM type wavelength converter

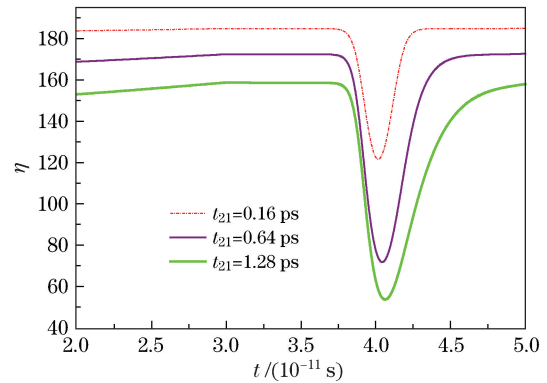


图 12 XPM 型逻辑异或门转换光的转换效率与  $t_{21}$  的关系

Fig. 12 Relationship between conversion efficiency and  $t_{21}$  of logical XOR gate based on XPM

图 13、14 分别为 XPM 型波长转换器的转换效率和 XPM 型逻辑异或门的转换效率与最大增益模式  $g_{\max}$  的关系。如图 13 所示, 输出信号光的转换效率随最大增益模式的增大而提高。当最大增益模式非常小时, 光增益较小, 有源区载流子发生受激辐射的几率也很小。随着最大增益模式的增大, 有源区载流子浓度的变化增大, 折射率的变化幅度增大, 快速的受激辐射导致探测光相位差的变化, 使得输出信号光的转换效率提高。在 XPM 型逻辑异或门中得到了同样的结论。

图 15 为在不同有源区长度下 XPM 型逻辑异或门的转换效率随时间的变化。随着有源区长度的增加, 输出信号光的转换效率得到提高。在有源区长度增加的过程中, 有源区载流子发生受激辐射的几率也增大, 折射率的变化幅度增大, 引起相位差的变化, 并快速输出逻辑转换信号, 使得转换效率提高。

图 16 为 XPM 型波长转换器的损耗系数与转换效率的关系。转换效率随着损耗系数的增大而降低, 损耗系数对转换效率的影响与 XGM 型波长转换器中损耗系数对转换效率的影响是相同的。基于 XGM 效应的波长转换器中载流子浓度的变化可引起增益调制, 从而实现波长转换。基于 XPM 效应的波长转换器中载流子浓度的变化首先引起折射率的变化, 而折射率的变化又会引起相位的变化, 从而实现波长转换。

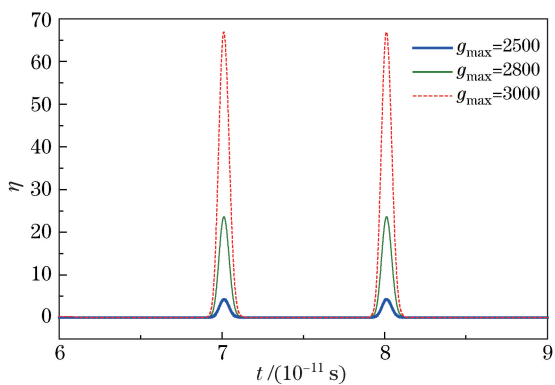


图 13 XPM 型波长转换器的转换效率与  $g_{\max}$  的关系  
Fig. 13 Relationship between conversion efficiency and  $g_{\max}$  of XPM type wavelength converter

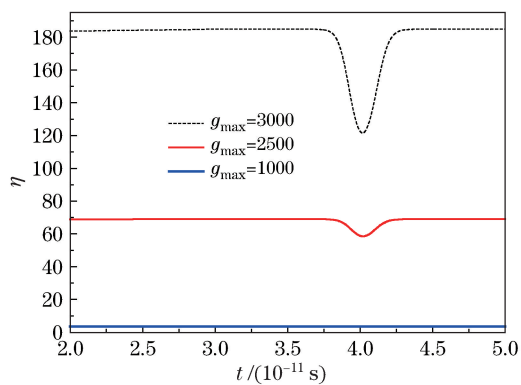


图 14 XPM 型逻辑异或门的转换效率与  $g_{\max}$  的关系  
Fig. 14 Relationship between conversion efficiency and  $g_{\max}$  of logical XOR gate based on XPM

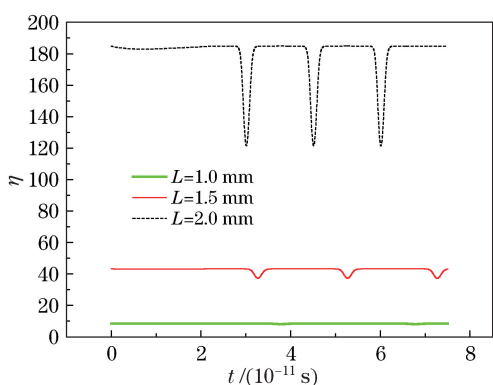


图 15 XPM 型逻辑异或门的转换效率与  $L$  的关系  
Fig. 15 Relationship between conversion efficiency and  $L$  of logical XOR gate based on XPM

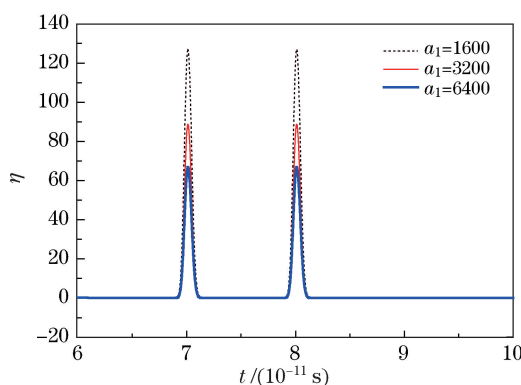


图 16 XPM 型波长转换器的转换效率与  $a_1$  的关系  
Fig. 16 Relationship between conversion efficiency and  $a_1$  of XPM wavelength converter

损耗系数对基于 XPM 效应和 XGM 效应的波长转换器的转换效率的影响是相同的。

## 4 结 论

基于 XGM 效应和 XPM 效应 QD-SOA 的全光波长转换原理,研究了 XGM 型和 XPM 型波长转换器的转换效率特性,分析了输入脉冲宽度、有源区长度、损耗系数、最大增益模式和电子跃迁时间等参量对转换效率的影响。仿真结果表明,减小输入脉冲宽度、损耗系数、跃迁时间和增加有源区长度、最大增益模式均可以提高波长转换器的转换效率;在基于 XPM 效应全光逻辑异或门中,通过优化参量,可以提高转换光的转换效率。

## 参 考 文 献

- [1] Liu Y, He J, Guo M J, *et al.* An overview of big data industry in China[J]. China Communications, 2014, 11(12): 1-10.
  - [2] Lee H J, Sohn M, Kim K, *et al.* Wavelength dependent performance of a wavelength converter based on cross-gain modulation and birefringence of a semiconductor optical amplifier[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1999, 11(2): 185-187.
  - [3] Roberto S, Eugenio I, Emilia P. Optical transport networks employing all-optical wavelength conversion: Limits and features[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1996, 14(5): 968-978.
  - [4] Lu Jia, Hu Yuanyuan, Liu Jianfei, *et al.* All-optical wavelength conversion based on parallel dual-pump for polarization multiplexing OFDM signal in SOA[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(2): 0205005.
- 卢 嘉, 胡园园, 刘剑飞, 等. 基于 SOA 的平行双抽运结构偏振复用 OFDM 信号的全光波长变换[J]. 中国激光,

2015, 42(2): 0205005.

- [5] Dong Yi, Zhao Shanghong, Li Yongjun, *et al.* Wavelength-shift-free optical regeneration on satellite using cascading SOA with two-stage offset filter[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(5): 0506008.  
董毅, 赵尚弘, 李勇军, 等. 基于级联 SOA 结合两级偏移滤波的波长保持型星上全光再生方案[J]. *光学学报*, 2015, 35(5): 0506008.
- [6] Ji Y F, Zhang J, Zhao Y L, *et al.* All optical switching networks with energy-efficient technologies from components level to network level[J]. *IEEE Journal of Selected Areas in Communications*, 2014, 32(8): 1600-1614.
- [7] Amor L. All-optical networks: Security issues analysis[J]. *Journal of Optical Communications and Networking*, 2015, 7(3): 136-145.
- [8] Hatta T, Miyahara T, Miyahara Y, *et al.* Polarization-insensitive monolithic 40-Gbps SOA-MZI wavelength converter with narrow active waveguides[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2007, 13(1): 32-39.
- [9] Kitsuwon N, Oki E. Performance of dynamic pump-wavelength selection for optical packet switch with chained parametric wavelength conversion[J]. *IEEE Journal of Optical Communications and Networking*, 2014, 6(2): 165-179.
- [10] Huang Dexiu, Zhang Xinliang, Huang Lirong. Semiconductor optical amplifier and its application[M]. Beijing: Science Press, 2012: 1-20.  
黄德修, 张新亮, 黄黎蓉. 半导体光放大器及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2012: 1-20.
- [11] Kuang Caixia, Chen Rongrong, Song Yingxiang, *et al.* Throughput potential of orthogonal frequency division multiplexing passive optical network uplink based on reflective semiconductor optical amplifiers[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(9): 0906002.  
邝彩霞, 陈荣荣, 宋英雄, 等. 基于反射式半导体光放大器的 OFDM-PON 上行通道吞吐潜力[J]. *光学学报*, 2016, 36(9): 0906002.
- [12] Hamie A, Sharaiha A, Guegan M, *et al.* All-optical logic NOR gate using two-cascaded semiconductor optical amplifiers[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2002, 14(10): 1439-1441.
- [13] Chen D L, Wang R, Pu T, *et al.* A novel threshold based on XGM effect in a DFB laser combined with external optical filtering[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2016, 8(1): 7801307.
- [14] Danielsen S L, Hansen P B, Stubkjaer K E, *et al.* All optical wavelength conversion schemes for increased input power dynamic range[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1998, 10(1): 60-62.
- [15] Shi S S, Wang H L, Gong Q, *et al.* Refined sectionalized method of QD-SOA[J]. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 2014, 125(1): 504-507.
- [16] Spyropoulou M, Pleros N, Vyrsokinos K, *et al.* 40 Gb/s NRZ wavelength conversion using a differentially-biased SOA-MZI: Theory and experiment[J]. *IEEE Journal of Lightwave Technology*, 2011, 29(10): 1489-1499.
- [17] Bilence A, Alizon R, Mikhelashvili V, *et al.* Broad-band wavelength conversion based on cross-gain modulation and four-wave mixing in InAs-InP quantum-dash semiconductor optical amplifier operating at 1550 nm[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2003, 15(4): 563-565.
- [18] Ben-Ezra Y, Haridim M, Lembrikov B I. Theoretical analysis of gain-recovery time and chirp in QD-SOA[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2005, 17(9): 1803-1805.
- [19] Maria S, Nikos P, Amalia M. SOA-MZI-based nonlinear optical signal processing: A frequency domain transfer function for wavelength conversion, clock recovery, and packet envelope detection[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2011, 47(1): 40-49.