

doi: 10.3788/gzxb20164511.1113002

基于量子点半导体光放大器全光波长变换特性

管磊, 王卓然, 袁国慧, 林志远, 杨梦

(电子科技大学 光电信息学院, 成都 610051)

摘要:从光电集成电路的角度出发,根据量子点半导体光放大器(QD-SOA)中载流子跃迁速率方程和光场传输方程,建立了 QD-SOA 等效电路模型,并通过电路仿真的方法对 QD-SOA 的增益谱、饱和增益特性等进行了仿真和分析;利用 QD-SOA 的交叉增益调制研究了速率分别为 40 Gbps、100 Gbps 和 160 Gbps 时的波长转换特性,并分析了不同的偏置电流、功率的信号光和探测光对输出信号消光比和 Q 值的影响,其转换速率可达到 100 Gbps,消光比 ER 约为 10 dB, Q 值约为 2.2. 该研究对提高基于 QD-SOA 的交叉增益调制波长转换的性能具有指导意义.

关键词:集成光学;波长转换;等效电路;量子点半导体光放大器;交叉增益调制

中图分类号: TN256

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2016)11-1113002-9

Characteristics of All-optical Wavelength Conversion Based on Quantum-dot Semiconductor Optical Amplifier

GUAN Lei, WANG Zhuo-ran, YUAN Guo-hui, LIN Zhi-yuan, YANG Meng

(School of Optoelectronic Information, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610051, China)

Abstract: From the Optoelectronic Integrated Circuits (OEIC), according to the rate equations of carriers transition and the equations of optical field propagation in Quantum Dot Semiconductor Optical Amplifiers (QD-SOA), an equivalent circuit model of QD-SOA was established. Based on the circuit simulation method, the gain spectrum and saturated gain characteristics of QD-SOA were simulated and analyzed. The characteristics of wavelength conversions at the rates of 40 Gbps, 100 Gbps and 160 Gbps were studied based on the Cross Gain Modulation (XGM) of QD-SOA respectively. Meanwhile, the effect of signal light and probe light with different bias current and power on the properties of the output signal, including the extinction ratio and Q factor, was analyzed. The rate of wavelength conversions can reach 100 Gbps, Extinction Ratio(ER) is about 10 dB and Q factor is about 2.2. This study is quite important for improving the performances of wavelength conversion based on XGM of QD-SOA.

Key words: Integrated optics; Wavelength conversion; Equivalent circuit mode; Quantum dot semiconductor optical amplifier; Cross gain modulation

OCIS Codes: 130.0130; 130.5990; 130.7405; 140.4480

0 引言

随着新一代全光网络的不断发展,具有高非线性效应的半导体光放大器(Semiconductor Optical Amplifier, SOA)受到广泛关注,近年来,具有多维量子限制效应的量子线(Quantum Line, QL)和量子点

(Quantum Dot, QD)低维材料的发展极大提高了 SOA 的性能,如意大利比萨圣安娜高等学校的 Contestabile^[1]、英国南安普顿大学的 Wilkinson^[2] 和荷兰埃因霍芬理工大学的 Solis-Trapala^[3] 等都对此进行了研究. 相较其它材料的 SOA, QD-SOA 具有阈值电流低、增益高、响应速度快、噪声指数低、饱和输出功率

基金项目:国家自然科学基金(No. 61575038)和中央高校基本科研业务费专项资金(No. ZYGX2015J052)资助

第一作者:管磊(1990-),男,硕士研究生,主要研究方向为光通信与集成光学. Email: 1510644711@qq.com

导师(通讯作者):王卓然(1977-),男,教授,博士,主要研究方向为微纳光子学、光通信及生物光子传感. Email: wangzhuoran@uestc.edu.cn

收稿日期:2016-04-29; **录用日期:**2016-09-09

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

高以及皮秒量级的超快增益恢复等优点^[4-8],在未来的全光通信、全光信号处理等领域优势明显。

光电集成电路(Optoelectronic Integrated Circuit, OEIC)已成为全光通信、全光信号处理等领域的关键技术,建立准确简便的光电子器件电路模型^[9]是获得OEIC的先决条件。将电路模型引入到QD-SOA的仿真中,建立QD-SOA等效电路模型^[10],可以借助成熟的电路仿真软件进行高效率地模拟仿真。而且电路模拟仿真的灵活性更强,模型复杂度和精确度的调节范围也可以更宽,在模拟QD-SOA全光波长转换中具有诸多优势。

全光通信网络路由节点处的核心功能是实现全光波长转换^[11-13]。而在众多的波长转换方法中,基于QD-SOA的交叉增益调制(Cross Gain Modulation, XGM)^[14]技术实现的全光波长转换器结构简单且具有超高速^[15-16]、高稳定性的工作能力,将使下一代全光路由节点具备高速波长转换与信息处理能力,应用前景十分广阔。

本文基于QD-SOA在全光波长转换技术中的应用展开,根据经典的Shockley关系式将载流子数目与节点电压相联系,将速率方程转换成电路回路,得到QD-SOA的等效电路模型,并对QD-SOA的增益谱、信号增益特性等进行仿真和分析,进一步研究了QD-SOA的交叉增益特性,完成了基于QD-SOA的交叉增益波长转换的仿真,并探讨了影响波长转换特性的诸多因素。

1 QD-SOA的电路模型

QD-SOA中的载流子跃迁状况与量子点激光器基本类似,但不存在谐振腔。由于当前的工艺水平可以将光放大器的端面反射系数限制在 10^{-5} 以下,故可忽略端面反射及反向光的传输。因此,QD-SOA的速率方程为

$$\frac{dN_{WL}}{dt} = \frac{I}{q \cdot A} + \frac{N_{ES}}{\tau_{WL}} - \frac{N_{WL}}{\tau_{ES}} \cdot f_{ES} - \frac{N_{WL}}{\tau_{WL}^{spon}} \quad (1)$$

$$\frac{dN_{GS}}{dt} = \frac{N_{ES}}{\tau_{GS}} f_{GS} - \frac{N_{GS}}{\tau_{ES}} f_{ES} - \frac{N_{GS}}{\tau_{GS}^{spon}} - \frac{\Gamma v_g g_{GS}}{1 + \epsilon S_{ave}} S_{ave} \quad (2)$$

$$\frac{dN_{ES}}{dt} = \frac{N_{WL}}{\tau_{ES}} f_{ES} + \frac{N_{GS}}{\tau_{ES}} f_{ES} - \frac{N_{ES}}{\tau_{GS}} f_{GS} - \frac{N_{ES}}{\tau_{WL}} - \frac{N_{ES}}{\tau_{ES}^{spon}} - \frac{\Gamma v_g g_{ES}}{1 + \epsilon S_{ave}} S_{ave} \quad (3)$$

式(1)~(3)描述了WL(Wetting Layer)、GS(Ground State)、ES(Excited State)上载流子面密度 N_{WL} 、 N_{GS} 、 N_{ES} 的变化;式中, I 为注入电流, A 为有源层的截面积, g_{GS} 与 g_{ES} 为QD-SOA的GS与ES增益^[17], f_{GS} 和 f_{ES} 分别为载流子在GS和ES上找到空位的概率, ϵ_{GS} 和 ϵ_{ES} 表示增益压缩系数,其它参量物理含义参见表1^[18]。

表1 模型中的主要参量

Symbol	Description	Value
E_{WL}	Emission energy of the WL	1.05 eV
$E_{ES,GS}$	ES,GS central energy transition	0.840 eV, 0.792 eV
N_D	QD surface density	$5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$
W	Width of active region	120 μm
L	Length of active region	2 450 μm
H	Height of QD	$1 \times 10^{-6} \text{ m}$
τ_{WL}^{spon}	Spontaneous emission from WL	500 ps
τ_{ES}^{spon}	Spontaneous emission from ES	500 ps
τ_{GS}^{spon}	Spontaneous emission from GS	1200ps
Γ	Optical confinement factor for the QD	0.036
α	Internal loss	1 000 m^{-1}
Γ_{hom}	Full-width at half maximum of homogeneous broadening	20 meV
β_{sp}	Spontaneous emission factor	10^{-3}
η_c	Differential quantum efficiency	0.45
ρ_{WLeff}	Effective density of states in the WL	2.4×10^{-15}
μ_{GS}	Degeneracy numbers of the corresponding states GS	2
μ_{ES}	Degeneracy numbers of the corresponding states ES	4

表1中的 τ_{ES}^{WL} 、 τ_{GS}^{WL} 、 τ_{GS}^{ES} 分别表示载流子从WL到ES、WL到GS、ES到GS的跃迁时间, τ_{ES}^{GS} 、 τ_{WL}^{GS} 、 τ_{WL}^{ES} 为载流子的逃逸时间, τ_{ES}^{WL} 、 τ_{GS}^{WL} 、 τ_{GS}^{ES} 的表达式为

$$\begin{cases} \tau_{ES}^{WL} = \tau_{GS}^{WL} = \frac{1}{\left(A_W + \frac{C_W \cdot N_{WL}}{V_{WL}}\right)} \\ \tau_{GS}^{ES} = \frac{1}{\left(A_E + \frac{C_E \cdot N_{WL}}{V_{WL}}\right)} \end{cases} \quad (4)$$

式中, H 为量子点的平均高度, A_W (A_E)、 C_W (C_E)分别为WL和ES中的光子系数和俄歇辅助跃迁系数。载流子的逃逸时间可以通过ES和GS的载流子的费米分布推测,它们与载流子的捕获时间的关系为

$$\begin{cases} \tau_{GS}^{ES} = \tau_{GS}^{ES} \cdot \frac{\mu_{GS}}{\mu_{ES}} \cdot \exp\left(\frac{E_{ES} - E_{GS}}{kT}\right) \\ \tau_{WL}^{ES} = \tau_{ES}^{WL} \cdot \frac{\mu_{ES} \cdot N_D \cdot N_1}{\rho_{WLeff}} \cdot \exp\left(\frac{E_{WL} - E_{ES}}{kT}\right) \\ \tau_{WL}^{GS} = \tau_{GS}^{WL} \cdot \frac{\mu_{GS} \cdot N_D \cdot N_1}{\rho_{WLeff}} \cdot \exp\left(\frac{E_{WL} - E_{GS}}{kT}\right) \end{cases} \quad (5)$$

式中, ρ_{WLeff} 为WL的有效态密度, N_1 为量子点的层数, k 为玻尔兹曼常量, T 为开氏温度, E_{WL} 、 E_{GS} 、 E_{ES} 分别为WL、GS和ES跃迁能的能级。

式(1)~(3)中的 S_{ave} 表示QD-SOA腔中的平均光子面密度,其可以表示为

$$S_{ave} = \frac{\lambda \cdot [P(L) - P(0)]}{\eta_c \cdot A \cdot h \cdot c \cdot v_g \cdot (\Gamma \cdot g - \alpha) \cdot L} \quad (6)$$

对式(1)~(3)和输出光功率进行数学变换, 得到具有电路元件的表示形式为

$$N(V_j) = N_0 \cdot \exp\left(\frac{qV_j}{2kT}\right) \quad (7)$$

$$P = V_p^2 / R_p \quad (8)$$

式中, N_0 为平衡态载流子面密度, V_j 为结电压. P 表示光功率, V_p 和 R_p 为光信号等效电压和等效电阻(设为 1Ω).

将式(6)和(7)代入式(1)~(3)中, 可将载流子的微分方程转换为式(9)、(10)、(11)所示的等效电路回路方程, 即

$$I + \frac{n_{ES0} \cdot N(V_{ES})}{\tau_{WL}^{ES}} = C_{WL} \frac{dV_{WL}}{dt} + \frac{n_{WL0} \cdot N(V_{WL})}{\tau_{WL}^{spn}} + \frac{n_{WL0} \cdot N(V_{WL})}{\tau_{ES}^{WL}} \left[1 - \frac{n_{ES0} \cdot N(V_{ES})}{4N_D} \right] \quad (9)$$

$$C_{GS} \frac{dV_{GS}}{dt} = \frac{n_{ES0} \cdot N(V_{ES})}{\tau_{GS}^{ES}} \left[1 - \frac{n_{GS0} \cdot N(V_{GS})}{2N_D} \right] - \frac{n_{GS0} \cdot N(V_{GS})}{\tau_{GS}^{ES}} \left[1 - \frac{n_{ES0} \cdot N(V_{ES})}{4N_D} \right] - \frac{n_{GS0} \cdot N(V_{GS})}{\tau_{GS}^{spn}} - \frac{\Gamma v_g g_{GS}}{1 + \epsilon S_{ave}} S_{ave} \quad (10)$$

$$C_{ES} \frac{dV_{ES}}{dt} = \frac{n_{WL0} \cdot N(V_{WL})}{\tau_{ES}^{WL}} \left[1 - \frac{n_{ES0} \cdot N(V_{ES})}{4N_D} \right] + \frac{n_{GS0} \cdot N(V_{GS})}{\tau_{ES}^{GS}} \left[1 - \frac{n_{ES0} \cdot N(V_{ES})}{4N_D} \right] - \frac{n_{ES0} \cdot N(V_{ES})}{\tau_{ES}^{GS}} \cdot \left[1 - \frac{n_{GS0} \cdot N(V_{GS})}{2N_D} \right] - \frac{n_{ES0} \cdot N(V_{ES})}{\tau_{ES}^{spn}} - \frac{n_{ES0} \cdot N(V_{ES})}{\tau_{WL}^{ES}} - \frac{\Gamma v_g g_{ES}}{1 + \epsilon S_{ave}} S_{ave} \quad (11)$$

式中, $C_{WL,GS,ES} = \frac{Aq^2 n_{WL,GS,ES} N(V_{WL,GS,ES})}{2kT}$.

根据式(9)~(11)可构造出 WL, GS 和 ES 的载流子微分方程的等效电路, 如图 1.

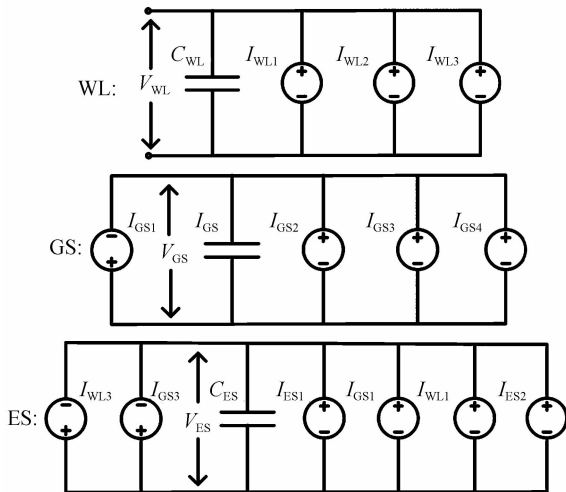


图 1 QD-SOA 的等效电路

Fig. 1 Equivalent circuit of QD-SOA

输出端的光功率可被等效为如图 2 的子电路, 且

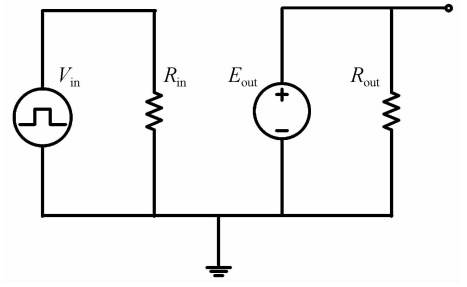


图 2 QD-SOA 的光传播方程的等效电路

Fig. 2 Equivalent circuit of optical propagation equation in QD-SOA

满足

$$P_{out} = \frac{E_{out}^2}{R_{out}} \quad (12)$$

$$E_{out} = \sqrt{\exp[(\Gamma g - \alpha_{in})L] V_{in}^2} \quad (13)$$

在完成 QD-SOA 电路模型的创建后, 对 QD-SOA 的增益特性进行了仿真.

图 3 为 QD-SOA 在不同的偏置电流下的增益谱, 偏置电流分别为 15 mA、40 mA、60 mA、100 mA、110 mA、200 mA、270 mA 和 400 mA.

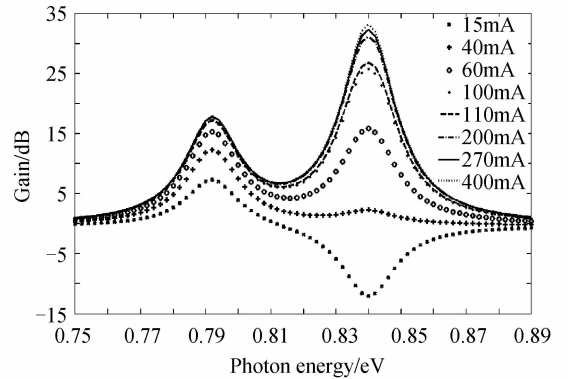


图 3 QD-SOA 的增益谱

Fig. 3 Gain spectrum of QD-SOA

从图 3 中可看到, QD-SOA 有两个增益峰值, 一个位于 0.79 eV 处, 另一个位于 0.84 eV 处, 对应的是 GS 和 ES 能级的光子能量, 且增益峰值随偏置电流的增大而增大; 当注入电流达到 100 mA 时, 电流继续增加 GS 增益基本保持不变, 增益达到了饱和; 而当注入电流达到 270 mA 时, ES 增益达到饱和; 在偏置电流低于 40 mA 时, 增益受 GS 主导, 这是由于 ES 的态密度大于 GS 的态密度, 而当偏置电流大于 60 mA 时, ES 开始主导整个 SOA 的增益.

图 4 表示在不同偏置电流下信号增益特性, 横坐标表示输入信号光功率 P_{in} , 纵坐标表示信号增益 G_{CW} , 其中偏置电流分别为 40 mA、60 mA、100 mA、300 mA.

把 P_{in} 增大到使 G_{CW} 从最大值减小 3dB 时所对应的的光放大器的输入光功率, 称为饱和输入功率 P_{sat} . 从图 4 中可以看出, 当偏置电流分别为 40 mA、60 mA、

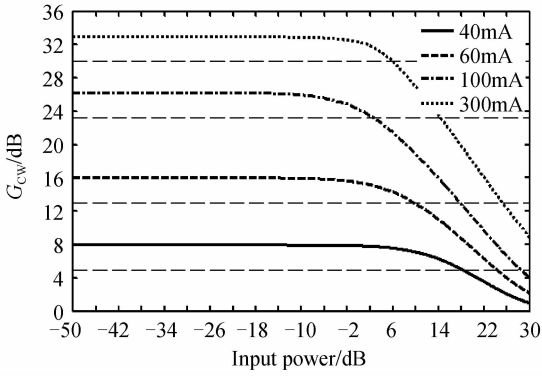


图4 光信号的增益特性

Fig. 4 Gain characteristic of optical signal

100 mA、300 mA时, P_{sat} 大约分别为 19 dBm、10 dBm、5 dBm、8 dBm, 从中可以看出, 当电流从 40 mA 增大到 100 mA 时, P_{sat} 逐渐减小, 而当从 100 mA 增大到 300 mA 时, P_{sat} 却增大了. 这是因为从图 3 可知, 当偏置电流从 40 mA 增大到 100 mA 时, QD-SOA 的总增益大约增大了 30 dB, 而偏置电流增大 60 mA 所增加的载流子, 不足以提供增益增大所消耗的载流子, 因此 P_{sat} 减小; 但当偏置电流从 100 mA 增大到 300 mA 时, QD-SOA 的总增益增大了只有 5 dB, 但其偏置电流却增大了 200 mA, 足以提供增益增大所消耗的载流子, 因此 P_{sat} 增大.

2 基于 QD-SOA 的 XGM 等效电路模型

2.1 工作原理

将信号光 (Short Wave, SW) 和连续的探测光 (Continuous Wave, CW) 同时注入到量子点光放大器中, SW 为 '0' 时, SW 不消耗基态的载流子, 使得 QD-SOA 的增益值较高, 因此 CW 获得较大增益, 输出放大的 CW 为 '1'; 反之, SW 为 '1' 时, SW 将消耗大部分基态载流子, 使得 QD-SOA 增益值较小, 因此 CW 获得较小增益, 输出的探测光为 '0', 即实现了波长的转换. 其电路原理图如图 5.

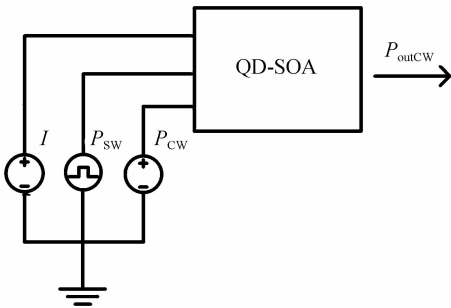


图5 基于 QD-SOA 电路模型的 XGM 的仿真电路

Fig. 5 Simulation circuit of XGM wavelength conversion based on circuit model of QD-SOA

由于此时 QD-SOA 中同时存在两束光, 所以须在

GS 和 ES 的速率方程中加入新的分量来表征两束光的变化, 新的速率方程为

$$\frac{dN_{GS}}{dt} = \frac{N_{ES}}{\tau_{ES}} f_{GS} - \frac{N_{GS}}{\tau_{GS}} f_{ES} - \frac{N_{GS}}{\tau_{GS}^{spont}} - \frac{\Gamma v_g g_{GSSW}}{1 + \epsilon S_{SW}} S_{SW} - \frac{\Gamma v_g g_{GSCW}}{1 + \epsilon \cdot S_{CW}} S_{CW} \quad (14)$$

$$\frac{dN_{ES}}{dt} = \frac{N_{WL}}{\tau_{ES}} f_{ES} + \frac{N_{GS}}{\tau_{ES}} f_{ES} - \frac{N_{ES}}{\tau_{GS}} f_{GS} - \frac{N_{ES}}{\tau_{WL}} - \frac{N_{ES}}{\tau_{ES}^{spont}} - \frac{\Gamma v_g g_{ESSW}}{1 + \epsilon S_{SW}} S_{SW} - \frac{\Gamma v_g g_{ESCW}}{1 + \epsilon S_{CW}} S_{CW} \quad (15)$$

式(14)、(15)中, S_{SW} 和 S_{CW} 分别表示沿腔长方向 SW 和 CW 的光子密度, G_{GSSW} 和 G_{ESSW} 是 SW 光从 GS 和 ES 中获得的光增益, G_{GSCW} 和 G_{ESCW} 是 CW 光从 GS 和 ES 中获得的光增益, WL 的载流子速率方程仍是式(1).

按照将 QD-SOA 转换成电路回路的方法将其转换成相应的等效电路, 如图 6.

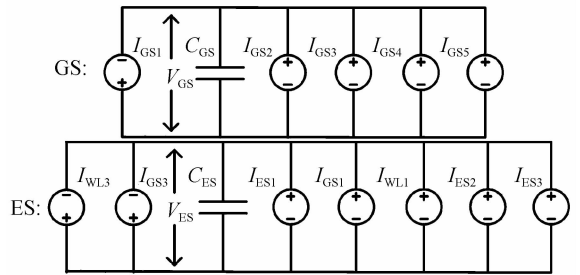


图6 QD-SOA 交叉增益调制的等效电路

Fig. 6 Equivalent circuit of QD-SOA XGM

至此, 便将速率方程全部转化成了等效电路模型, 之后用等效电路对 QD-SOA 交叉增益调制特性进行仿真分析, 模型中参量见表 1.

2.2 不同速率的信号光对输出信号的影响

将传输速率分别为 40 Gbps、100 Gbps、160 Gbps 的信号光 (SW) 和连续的探测光 (CW) 同时注入 QD-SOA 中. SW 的周期分别为 100 ps、40 ps、25 ps, 脉冲宽度分别为 25 ps、10 ps、6.25 ps, 在一个周期内的码型可视为 '1000', 其波形如图 7(a)、8(a)、9(a), 其中纵坐标表示相对功率. SW 的码元为 '1' 时的光功率 P_{inSW} 为 15 dBm, CW 的输入光功率 P_{inCW} 为 -5 dBm, SW 和 CW 的输出光功率分别用 P_{outSW} 、 P_{outCW} 表示.

图 7~9 分别是 SW 的传输速率为 40 Gbps、100 Gbps、160 Gbps 时的输入输出信号波形, 图中(b)、(c)、(d)的电流分别设置为 100 mA、200 mA、300 mA.

从图 7~9 中的(b)可看出, 在偏置电流为 100 mA 时, 输出波形均呈明显的锯齿状, 其原因根据 QD-SOA 的增益谱(图 3)可知, 在偏置电流较小时, QD-SOA 的增益较小, 故载流子数随着 P_{inSW} 的变化不能很快地得到恢复, 导致 P_{outCW} 的下降与上升时间较长. 从图 8 中可看出, 在传输速率为 100 Gbps 时, 当偏置电流从 100 mA 增大到 300 mA 时, P_{outCW} 的下降时间分别为 10 ps、5 ps、2.5 ps, 分别占码元宽度的 1、1/2、

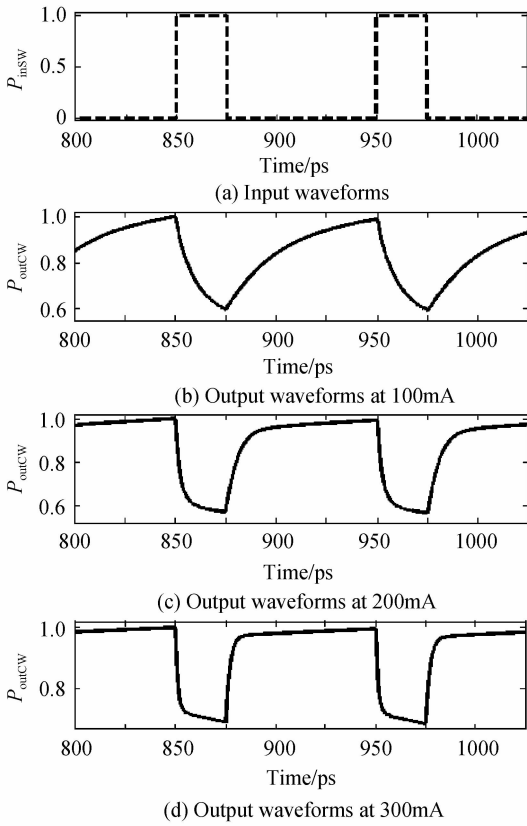


图 7 传输速率为 40 Gbps 时输入输出波形
Fig. 7 Input and output waveforms at transmission rate of 40 Gbps

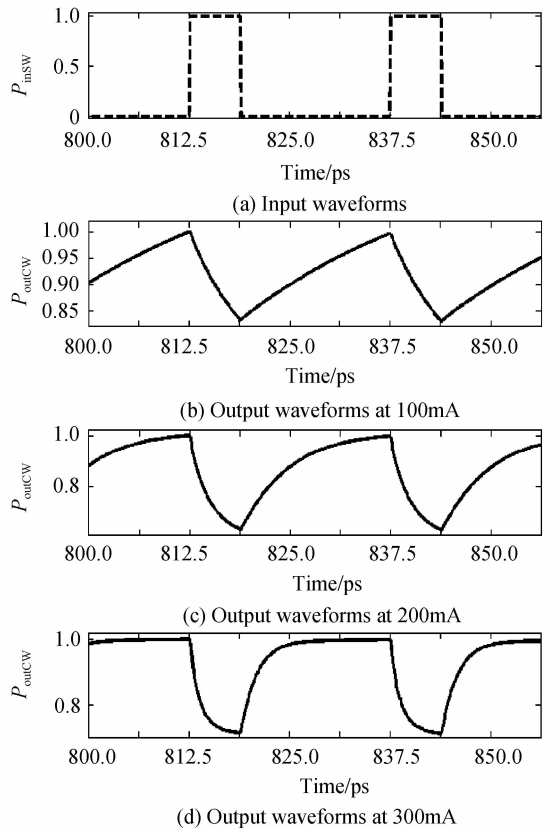


图 9 传输速率为 160 Gbps 时输入输出波形
Fig. 9 Input and output waveforms at transmission rate of 160 Gbps

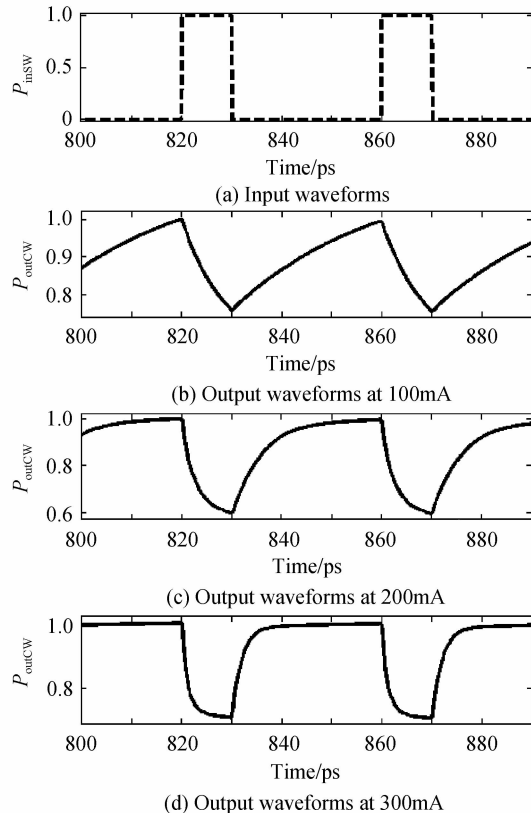


图 8 传输速率为 100 Gbps 时输入输出波形
Fig. 8 Input and output waveforms at transmission rate of 100 Gbps

1/4, 而上升时间分别为 30 ps、20 ps、10 ps, 分别是码元宽度的 3、2、1 倍, 且随着偏置电流的增大, 上升时间与下降时间之差变小, 即波形的对称性变好, 这说明随着偏置电流的增大, 波长转换效果会变好, 其原因可从 QD-SOA 的增益谱(图 3)看出, 偏置电流增大, QD-SOA 的增益增大, 载流子数目随着 P_{inSW} 的变化可以很快地得到恢复. 通过对比图 7、8、9 中的 (d), 在偏置电流为 300 mA, 传输速率分别为 40 Gbps、100 Gbps、160 Gbps 时, 随着传输速率的增大, 其波形的对称性变差, 这说明随着传输速率的增大, 波长转换效果变差, 这是由于在偏置电流一定时, QD-SOA 的增益不变, 载流子的变化跟不上 P_{inSW} 的变化.

从图 7(b) 中可以看出, 当传输速率为 40 Gbps 时, 偏置电流为 200 mA 时, P_{outCW} 的下降和上升时间大约分别为 6.25 ps、12.5 ps, 占码元宽度比例分别为 1/4、1/2, 波形具有比较好的对称性, 可达到较好的转换效果; 当传输速率增大到 100 Gbps 时, 从图 8(d) 中可以看出, 只有将偏置电流增大到 300 mA 时, 以及适当增大 QD-SOA 的增益, 输出波形才比较好, 才可达到较好的转换效果, 这说明增大偏置电流可提高波长转换速率; 而当传输速率为 160 Gbps 时, 从图 9(d) 中可以看出, 即使将偏置电流增大到 300 mA, 其波形几乎呈现锯齿状, 未达到良好的转换效果, 这说明波长转换速率

不能通过提高偏置电流来无限地提高. 这对提高 QD-SOA 的波长转换效果具有指导意义.

2.3 信号光和探测光的光功率对输出信号消光比的影响

输出信号的消光比 (Extinction Ratio, ER) 是一个很重要的指标, ER 过低会引起对码元的误判等问题. 因此需进一步研究 P_{inSW} 和 P_{inCW} 对 ER 的影响.

将信号光 SW 的传输速率分别设置为 40 Gbps、100 Gbps 和 160 Gbps, 将 QD-SOA 偏置电流设置为 300 mA, P_{inCW} 保持 -5 dBm 不变时, 在不同的传输速率下, P_{inSW} 对消光比 ER 的影响如图 10.

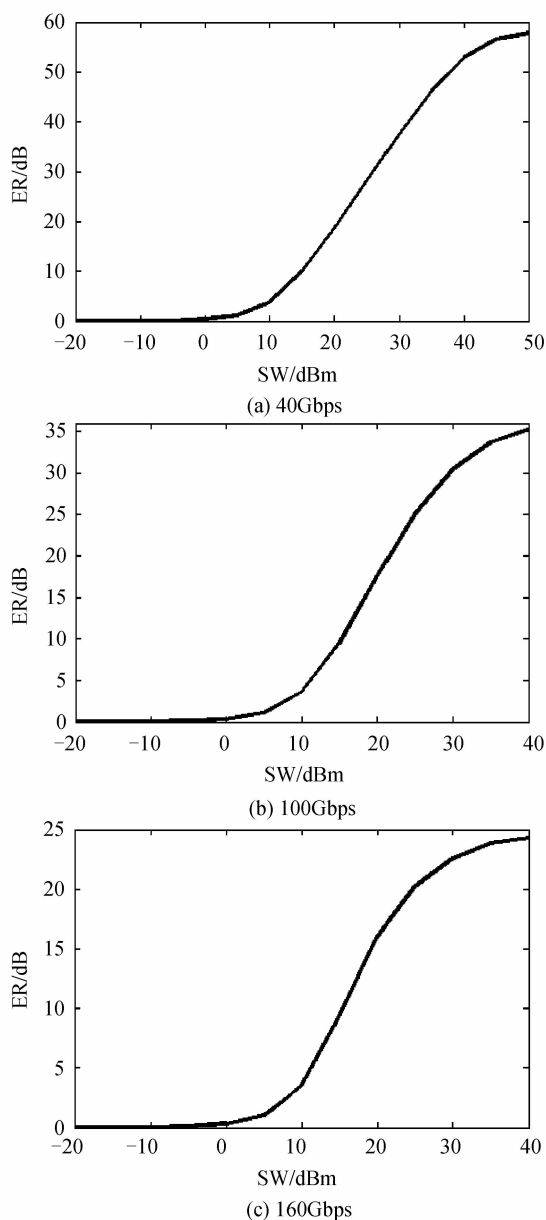


图 10 SW 速率不同时, P_{inSW} 对输出信号 ER 的影响
Fig. 10 Effect of P_{inSW} on ER of the output signal under the different transmission rates of SW

在传输速率为 100 Gbps 的条件下, 从图 10(b) 中可以看出, 当 P_{inSW} 小于 0 dBm 时, ER 基本为 0 dB, 这

是由于此时 P_{inSW} 较小, 对 QD-SOA 中的载流子的影响较小, 故对 P_{inCW} 的影响也较小, 从而输出的探测光 P_{outCW} 基本保持不变; 而当 P_{inSW} 从 0 dBm 增大时, ER 出现了明显的上升趋势, 但当 P_{inSW} 增大到 45 dBm 后, 由于 P_{inSW} 达到了饱和输入功率 P_{sat} , ER 基本不再增大, 这表明可通过增大 P_{inSW} 来增大 ER, 但不能通过增大 P_{inSW} 来无限地增大 ER. 从图 10 中可看出, 当 P_{inSW} 为 15 dBm 时, 传输速率 40 Gbps、100 Gbps 和 160 Gbps 所对应的 ER 分别大约为 12 dB、10 dB、7 dB, 这也说明随着传输速率增大, ER 会减小, 转换效果变差, 这是由于当传输速率较大时, QD-SOA 中的载流子恢复不及时, 影响了输出光 P_{outCW} 的消光比 ER.

当 P_{inSW} 为 15 dBm, 其它参量保持不变时, 在不同传输速率下, P_{inCW} 对 ER 的影响如图 11.

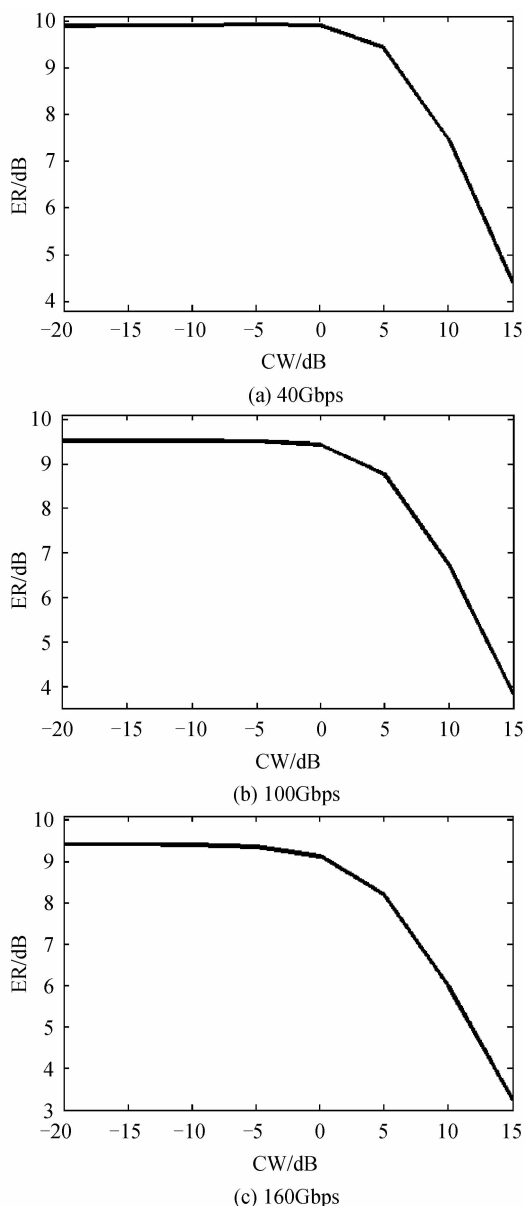


图 11 SW 速率不同时, P_{inCW} 对输出信号 ER 的影响
Fig. 11 Effect of P_{inCW} on ER of the output signal under the different transmission rates of SW

在传输速率为 100 Gbps 时, 从图 11(b) 中可看出, 当 P_{inCW} 小于 0 dBm 时, ER 基本保持为 10 dB; 而当 P_{inCW} 大于 0 dBm 时, ER 出现了明显的下降趋势, 这是由于当 P_{inCW} 较大时, P_{inCW} 会消耗一部分载流子, 故影响了输出光 P_{outCW} 的消光比 ER. 从图 11 中可看出, 传输速率为 40 Gbps、100 Gbps、160 Gbps 时, 在 ER 基本保持不变的范围内, ER 大约分别为 9.9 dB、9.6 dB、9.3 dB, 逐渐减小, 即表明随着传输速率提高, 转换效果变差. 通过以上对 P_{inSW} 和 P_{inCW} 对 ER 的影响的仿真可表明, 在基于 QD-SOA 交叉增益调制的超高速波长变换中, 在传输速率达到 100 Gbps 时, 输出探测光的消光比可达到 10 dB 左右, 其转换速率明显优于其他材料 SOA 的性能.

进一步研究 SW 和 CW 的光子能量对 ER 的影响, 仿真结果如图 12. 其中传输速率设置为 100 Gbps, CW 的光子能量和 SW 光子能量均在 0.75~0.89 eV 的范围内变化, GS 和 ES 共振光子能量分别为 0.79 eV、0.84 eV.

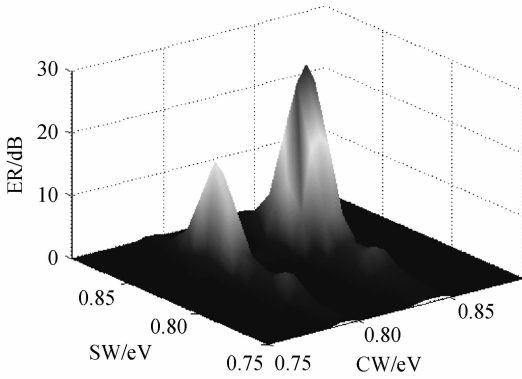


图 12 SW 和 CW 的光子能量对输出信号 ER 的影响
Fig. 12 Effect of photon energy of SW and CW on ER of the output signal

从图 12 中可看出, 当 SW 的光子能量在 0.84 eV 附近时, 随着 CW 光子能量的变化, ER 会出现两个极大值, 其位置分别在 CW 光子能量为 0.79 eV 和 0.84 eV 附近. 当 SW 的光子能量在 0.79 eV 附近时, 随着 CW 光子能量的变化, ER 也会出现两个极大值, 但远小于 SW 光子能量在 0.84 eV 而 CW 的光子能量在 0.79 eV 或 0.84 eV 附近时 ER 的极大值. 因此, SW 光子能量在 0.84 eV 而 CW 的光子能量在 0.79 eV 或 0.84 eV 附近时, 基于 QD-SOA 的交叉增益调制的波长转换将可获得最优性能.

2.4 信号光和探测光的光功率对输出信号 Q 值的影响

当 P_{inCW} 设置为 -5 dBm, 偏置电流设置为 300 mA 时, 在不同传输速率下, P_{inSW} 对 Q 值影响如图 13.

从图 13 中可看出, 当 P_{inSW} 小于 0 dBm 时, Q 值基本不变, 这是由于此时 P_{inSW} 较小, 对 QD-SOA 中的载

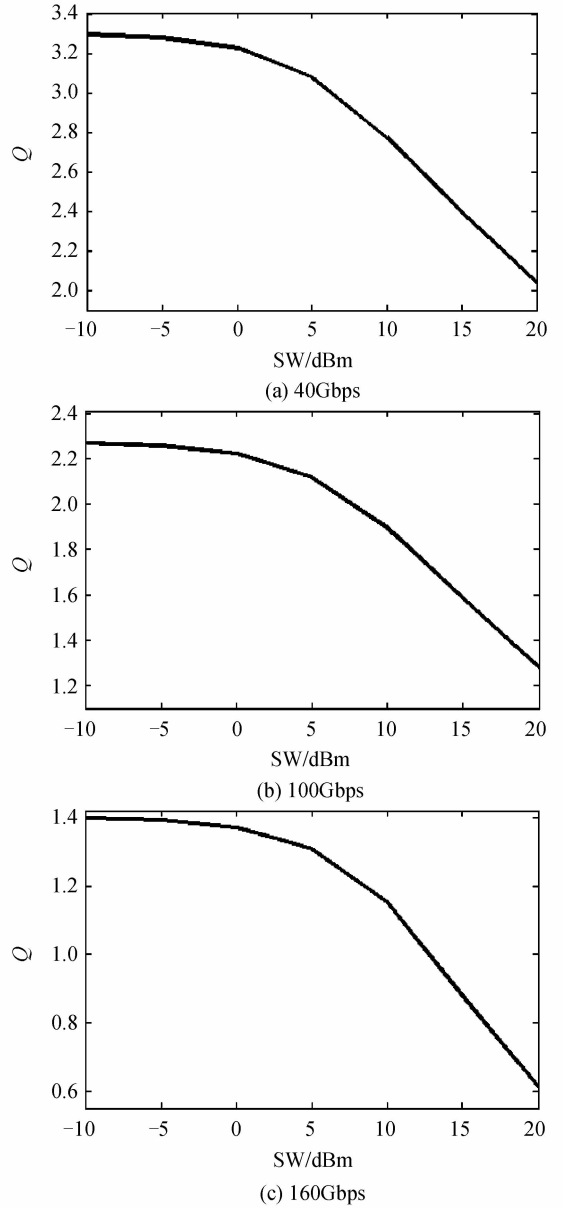


图 13 SW 速率不同时, P_{inSW} 对输出信号 Q 值的影响
Fig. 13 Effect of P_{inSW} on Q factor of the output signal under the different transmission rates of SW

流子的影响很小, 故对 P_{inCW} 的影响也很小, 从而输出的探测光 P_{outCW} 的 Q 保持不变; 而当 P_{inSW} 从 0 dBm 开始增大时, Q 值出现了明显的下降趋势, 而且随着传输速率的增大, Q 值保持不变的数值大约分别为 3.3、2.2、1.35, 再逐渐变小, 这是由于当传输速率较大时, QD-SOA 中的载流子恢复不及时, 影响了输出光 P_{outCW} 的 Q 值. 当传输速率为 100 Gbps 时, 通过结合图 10(b) 和图 13(b), 可以看出 P_{inSW} 不能太大也不能太小, 保持在 15 dBm 左右为最优.

当 P_{inSW} 设置为 15 dBm, 偏置电流设置为 300 mA 时, 在不同的传输速率下, P_{inCW} 对 Q 值的影响如图 14.

从图 14 中可看出, 在不同的传输速率下, 当 P_{inCW} 小于 -5 dBm 时, Q 值缓慢地下降, 而当 P_{inCW} 从

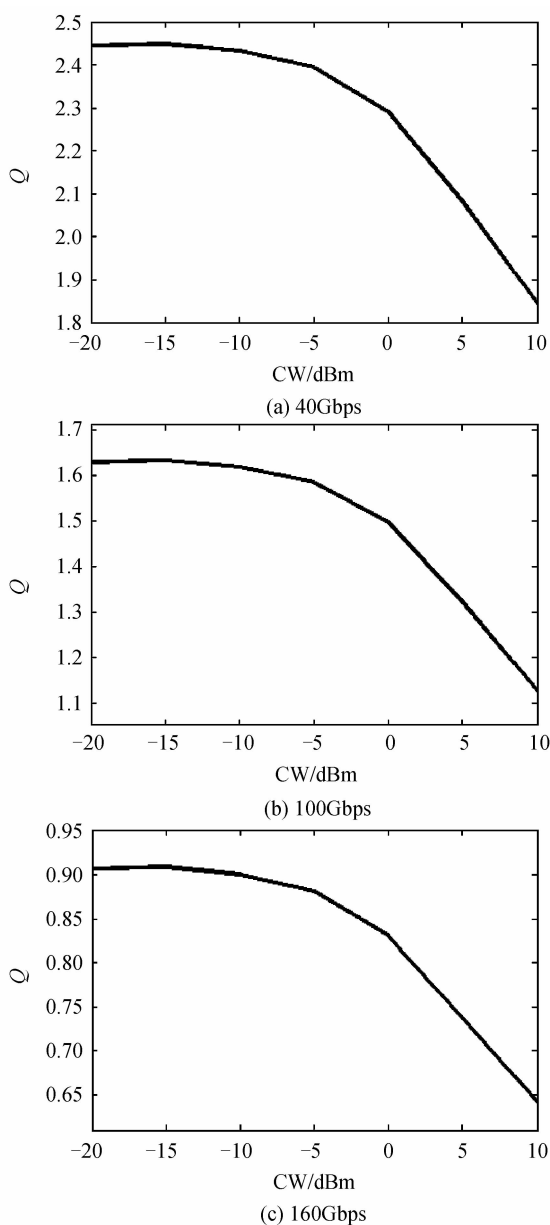


图 14 SW 速率不同时, P_{inCW} 对输出信号 Q 值的影响
Fig. 14 Effect of P_{inCW} on Q factor of the output signal under the different transmission rates of SW

-5 dBm 开始增大时, Q 值出现了明显的下降趋势, 这是由于当 P_{inCW} 较大时, P_{inCW} 会消耗一部分载流子, 故影响了输出光 P_{outCW} 的 Q 值; 而且随着传输速率的增大, 在 Q 值缓慢地下降的范围内, 即 P_{inCW} 小于 -5 dBm 时, Q 值大约分别为 2.4、1.6、0.9, 再逐渐变小, 这也说明随着传输速率的增大, 波长转换效果会变差. 当传输速率为 100 Gbps 时, 通过结合图 11(b) 和图 14(b), 可以看出 P_{inCW} 应要小于 -5 dBm, 但是 P_{inCW} 过小会使得输出的绝对光功率 P_{outCW} 过小而不利于探测, 故 P_{inCW} 保持在 -5 dBm 左右为最优.

SW 和 CW 的光子能量对 Q 值的影响如图 15. 其中 SW 的传输速率为 100 Gbps, SW 和 CW 光子能量均在 0.75~0.89 eV 范围内.

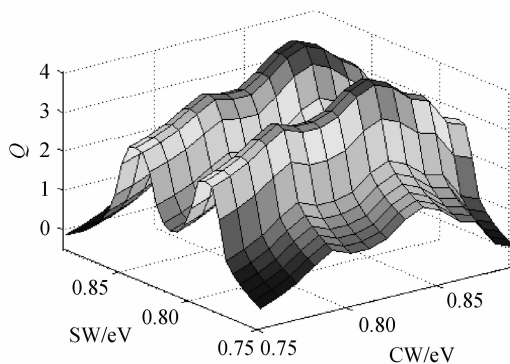


图 15 SW 和 CW 的光子能量对输出信号的 Q 值的影响
Fig. 15 Effect of photon energy of SW and CW on the output signal of Q

从图 15 中可以看出, 当 CW 的光子能量在 0.84 eV 附近, 而 SW 光子能量在 0.79 eV 或 0.84 eV 时, Q 值均达到极大值. 因此, CW 的光子能量在 0.84 eV 附近, 而 SW 光子能量在 0.79 eV 或 0.84 eV 时, 基于 QD-SOA 的交叉增益调制的波长转换将可获得最优性能.

综合仿真结果, 为使转换速率达到 100 Gbps, 最好使 P_{inSW} 保持 15 dBm, 而 P_{inCW} 保持 -5 dBm, 且 SW 和 CW 的光子能量尽量都取在 ES 的共振光子能量 0.84 eV 附近.

3 结论

本文根据 QD-SOA 中载流子速率方程和光传播方程, 建立了 QD-SOA 的等效电路模型. 基于此模型, 完成了对 QD-SOA 的增益谱、信号增益特性等进行了仿真与分析, 分析结果表明: GS 的饱和增益电流为 100 mA, ES 的饱和增益电流为 270 mA, 饱和输入功率 P_{sat} 随电流的增大先减小后增大, 对在 QD-SOA 的 XGM 波长转换中参量的设置具有指导意义. 然后, 建立了 QD-SOA 的 XGM 波长转换的电路模型, 利用此模型实现了对不同速率光波长转换的仿真, 其转换速率可达到 100 Gbps, 实现了超高速波长转换, 对后续基于 QD-SOA 的 XGM 的高速波长转换的器件实现具有指导意义. 但此模型的局限性在于没有考虑带内效应(如光谱烧孔, 载流子加热等)对于增益谱的影响, 需进一步研究带内效应的具体表达形式, 完善此等效电路模型.

参考文献

- [1] CONTESTABILE G, MARUTA A, KITAYAMA K. Gain dynamics in quantum-dot semiconductor optical amplifiers at 1550 nm[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2010, **13** (22): 987-989.
- [2] WILKINSON S, LINGNAU B, KORN J, *et al.* Influence of noise on the signal quality of quantum-dot semiconductor optical amplifiers[J]. *Selected Topics in Quantum Electronics, IEEE Journal of*, 2013, **19**(4): 1900106-1900106.
- [3] SOLIS-TRAPALA K, DORREN H J S. Dynamic and static

- gain characteristics of quantum-dot semiconductor optical amplifiers operating at 1.5 μm [J]. *Optics Communications*, 2013, **298**: 106-113.
- [4] KIM J, MEUER C, BIMBERG D, *et al.* Numerical simulation of temporal and spectral variation of gain and phase recovery in quantum-dot semiconductor optical amplifiers[J]. *Quantum Electronics, IEEE Journal of*, 2010, **46**(3): 405-413.
- [5] MAJER N, DGE K LÜ, SCHÖLL E. Cascading enables ultrafast gain recovery dynamics of quantum dot semiconductor optical amplifiers[J]. *Physical Review B*, 2010, **82**(23): 235301.
- [6] MA S, SUN H, CHEN Z, *et al.* High speed all-optical PRBS generation based on quantum-dot semiconductor optical amplifiers[J]. *Optics Express*, 2009, **17**(21): 18469-18477.
- [7] XU Hai-xin, WANG Hai-long, YAN Jin-yi, *et al.* Gain and linewidth enhancement factor of InAs/GaAs quantum-dot laser diodes[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2015, **36**(5): 567-571.
许海鑫, 王海龙, 严进一, 等. InAs/GaAs 量子点激光器的增益和线宽展宽因子[J]. *发光学报*, 2015, **36**(5): 567-571.
- [8] KOU Li-jie, LI Fu-shan, GUO Tai-liang. Preparation of blue light-emitting graphene quantum dots from carbon nanotube and application in nonvolatile polymer memory devices[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2014, **35**(5): 618-622.
寇丽杰, 李福山, 郭太良. 碳纳米管制备蓝光石墨烯量子点及其在柔性有机存储器上的应用[J]. *发光学报*, 2014, **35**(5): 618-622.
- [9] 陈维友, 杨树人, 刘式墉. 光电子器件模型与 OEIC 模拟[M]. 国防工业出版社, 2001:245-253.
- [10] MARAM Q R, BAGHBAN H, RASOOLI S H, *et al.* Equivalent circuit model of quantum dot semiconductor optical amplifiers: dynamic behaviour and saturation properties[J]. *Journal of Optics A-Pure & Applied Optics*, 2009, **11**(10): 670-674.
- [11] HANG Xi, ZHANG Xin-Liang, DONG Jian-Ji, *et al.* Theoretical study on non-inverted wavelength conversion based on semiconductor optical amplifier and optical band-pass filter[J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, **59**(2): 1021-1029.
- 黄喜, 张新亮, 董建绩, 等. 基于半导体光放大器和光学滤波器的同相波长转换理论研究[J]. *物理学报*, 2010, **59**(2): 1021-1029.
- [12] ZHANG Hong-Bin, QIU Kun, LI Zhong-Gui. Investigation on characteristics of all-optical wavelength converter based on SOA-XGM[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2002, **31**(3): 337-344.
张宏斌, 邱昆, 李中桂. 基于半导体光放大器交叉增益调制(SOA-XGM)波长变换器仿真研究[J]. *光子学报*, 2002, **31**(3): 337-344.
- [13] ZHANG Wei, MA Jun-shan, CHEN Jia-bi. Analysis for frequency chirp of all-optical wavelength converter based on semiconductor laser[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(7): 1042.
张巍, 马军山, 陈家璧. 半导体激光器型全光波长转换器的啁啾分析[J]. *光子学报*, 2005, **34**(7): 1042-1045.
- [14] CONTESTABILE G, MARUTA A, SEKIGUCHI S, *et al.* Cross-gain modulation in quantum-dot SOA at 1550 nm[J]. *Quantum Electronics, IEEE Journal of*, 2010, **46**(12): 1696-1703.
- [15] MATSUURA M, RAZ O, GOMEZ-AGIS F, *et al.* Ultrahigh-speed and widely tunable wavelength conversion based on cross-gain modulation in a quantum-dot semiconductor optical amplifier [J]. *Optics Express*, 2011, **19**(26): B551-B559.
- [16] MEUER C, SCHMECKEBIER H, FIOLE G, *et al.* Cross-gain modulation and four-wave mixing for wavelength conversion in undoped and p-doped 1.3-quantum dot semiconductor optical amplifiers [J]. *Photonics Journal, IEEE*, 2010, **2**(2): 141-151.
- [17] TILMA B W, TAHVILI M S, KOTANI J, *et al.* Measurement and analysis of optical gain spectra in 1.6 to 1.8 μm InAs/InP (100) quantum-dot amplifiers[J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2009, **41**(10): 735-749.
- [18] VESELINOV K, GRILLOT F, GIOANNINI M, *et al.* Lasing spectra of 1.55 μm InAs/InP quantum dot lasers: theoretical analysis and comparison with the experiments[J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2008, **40**(2-4): 227-237.