

光学学报

基于光子晶体的量子点半导体光放大器波长转换特性

李晓博¹, 王海龙^{1*}, 马利男¹, 龚谦²

¹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;

²中国科学院上海微系统与信息技术研究所中国科学院太赫兹固态技术重点实验室, 上海 200050

摘要 量子点半导体光放大器(QD-SOA)具有皮秒级的增益恢复时间和超快的载流子浓度恢复等特点,光子晶体(PC)与QD-SOA结合后具有强非线性效应、低吸收损耗、高功率传输和低功耗等优点。研究了光子晶体-量子点半导体光放大器(PC-QDSOA)的波长转换特性,详细分析了最大模式增益、泵浦光功率、探测光功率、有源区长度对PC-QDSOA波长转换Q因子的影响及注入电流、泵浦光功率、探测光功率、有源区长度与PC-QDSOA波长转换消光比的关系,并将PC-QDSOA仿真结果与QD-SOA的仿真结果进行比较。结果显示PC-QDSOA的Q因子和消光比的数值总是大于QD-SOA,说明PC-QDSOA比QD-SOA的输出信号质量更好,信号传输效率更高,转换性能更优越。研究结果对PC-QDSOA的应用具有一定的指导意义。

关键词 光通信;量子点半导体光放大器;光子晶体;波长转换;Q因子;消光比

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202242.0206001

Wavelength Conversion Characteristics of Quantum-Dot Semiconductor Optical Amplifier Based on Photonic Crystal

Li Xiaobo¹, Wang Hailong^{1*}, Ma Linan¹, Gong Qian²

¹ Shandong Provincial Key Laboratory of Laser Polarization and Information Technology, School of Physics and Engineering, Qufu Normal University, Qufu, Shandong 273165, China;

² Key Laboratory of Terahertz Solid-State Technology, Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China

Abstract A quantum-dot semiconductor optical amplifier (QD-SOA) has the characteristics of picosecond gain recovery time and ultrafast carrier concentration recovery. The combination of photonic crystal (PC) and QD-SOA has the advantages of strong nonlinear effect, less absorption loss, high power transmission, and low power consumption. The wavelength conversion characteristics of photonic crystal-quantum dot semiconductor optical amplifiers (PC-QDSOAs) are studied, the influences of maximum mode gain, pumping power, detecting power, and active region length on the Q-factor of PC-QDSOA wavelength conversion are analyzed, and the relationships among the injection current, pumping power, detecting power, active region length, and extinction ratio of PC-QDSOA wavelength conversion are analyzed in detail. The simulation results of QD-SOA and PC-QDSOA are compared. The results show that the values of Q-factor and extinction ratio of PC-QDSOA are greater than that of QD-SOA, which indicates that the output signal quality, signal transmission efficiency, and conversion performance of PC-QDSOA are better than that of QD-SOA. The research results have guiding significance for the application of PC-QDSOA.

Key words optical communications; quantum-dot semiconductor optical amplifier; photonic crystal; wavelength conversion; Q-factor; extinction ratio

收稿日期: 2021-05-11; 修回日期: 2021-07-06; 录用日期: 2021-08-09

基金项目: 国家自然科学基金(61674096)、山东省自然科学基金(ZR2019PA010)

通信作者: *hlwang@qfnu.edu.cn

1 引言

随着光通信技术的迅速发展,实际应用对网络带宽和数据存储容量的要求越来越高,并且目前的全光网络还存在“光电转换瓶颈”^[1-2],亟须发展具备快速处理全光信号能力的器件来解决以上问题。量子点半导体光放大器(QD-SOA)与普通半导体光放大器(Bulk SOA)、量子阱半导体光放大器(QW-SOA)相比,具有更短的载流子浓度恢复时间、皮秒级增益恢复时间、低温度灵敏性、小噪声系数、低阈值电流、大微分增益、大调制带宽等优越特性^[3-4],而增益恢复时间的减少又可以显著增加系统的响应时间,且 QD-SOA 对光纤非线性光功率的要求也比较低,可以快速处理全光信号;而光子晶体(PC)作为一种介电材料,由于具有光子局域、光子禁带、抑制自发辐射^[5]等特性,其与光子器件相结合时,会使光子器件表现出更快的动态响应,并且具有体积小、吸收损耗低、传输功率高、低功耗、大增益和低噪声等特性^[6]。如果将 QD-SOA 和光子晶体的优势相结合,光子晶体-量子点半导体光放大器(PC-QDSOA)就可能具有更优越的性能,因此也成为目前一个新的研究方向。

全光波长转换(AOWC)技术以其可以降低网络阻塞率、实现波长的再利用等优点,成为密集波分光网络中的关键技术^[7-8],此前,本课题组提出了 QD-SOA 的细化分段方法^[9],并对基于 QD-SOA 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研究^[10],还利用 QD-SOA 级联 XGM 和 XPM 结构对全光与非门进行了分析^[11]。本文研究了 PC-QDSOA 的波长转换特性,详细分析了最大模式增益、泵浦光功率、探测光功率、有源区长度、注入电流、Q 因子、消光比的关系,并与 QD-SOA 仿真结果进行比较。

2 理论基础

2.1 QD-SOA 的三能级结构

QD-SOA 的三能级结构分别为浸润层(WL)、激发态(ES)和基态(GS),当 QD-SOA 中有电流注入时,电流中的电子首先进入能级最高的浸润层,产生大量载流子;电流中的电子达到一定浓度时,开始跃迁到第二能级激发态,随后再由激发态跃迁到第三能级基态,处于基态的载流子与进入有源区内的光子发生受激辐射,进而实现放大功能^[12-13]。

图 1 中, τ_{w2} 表示电子从 WL 跃迁到 ES 的时间, τ_{21} 表示电子从 ES 跃迁到 GS 的时间, τ_{wr} 表示电子从 WL 自发辐射的时间, τ_{1r} 表示电子从 GS 自发辐射的时间;此外,电子还会从 GS 和 ES 分别向 ES 和 WL 逆向跃迁, τ_{12} 和 τ_{2w} 分别表示电子从 GS 到 ES、从 ES 到 WL 的弛豫时间^[12-13]。

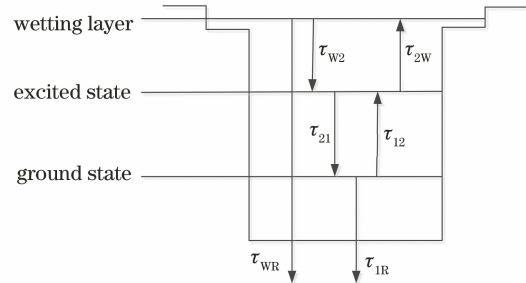


图 1 QD-SOA 的三能级结构图

Fig. 1 Three-level structural diagram of QD-SOA

2.2 QD-SOA 的工作原理

QD-SOA 中,三能级跃迁速率方程用来表示载流子浓度分布变化、输出特性和增益特性^[14],方程如下:

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

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{N_w L_w (1-h)}{N_Q \tau_{w2}} -$$

$$\frac{h}{\tau_{2w}} - \frac{h(1-f)}{\tau_{21}} + \frac{f(1-h)}{\tau_{12}}, \quad (2)$$

$$\frac{\partial f}{\partial t} = \frac{h(1-f)}{\tau_{21}} - \frac{f(1-h)}{\tau_{12}} - \frac{f^2}{\tau_{1r}} -$$

$$\sum_{i=A} \frac{L_w g_i(\omega_i) P}{N_Q A_{\text{eff}} h_1 \omega_i}, \quad (3)$$

式中: N_w 为载流子在 WL 的浓度; J 和 e 分别为注入电流的密度和电子的电量; L_w 为有源区的厚度; N_Q 为表面量子点的密度; h 、 f 分别为电子在激发态和基态出现的概率; τ_{w2} 表示电子从 WL 跃迁到 ES 的时间; τ_{21} 表示电子从 ES 跃迁到 GS 的时间; τ_{wr} 表示电子从 WL 自发辐射的时间;电子还会从 GS 和 ES 分别向 ES 和 WL 逆向跃迁, τ_{12} 和 τ_{2w} 分别表示电子从 GS 到 ES、从 ES 到 WL 逆向跃迁的弛豫时间; $g_i(\omega_i)$ 为第 i 段的模式增益; P 为输出光功率; A_{eff} 为有效光场面积, $A_{\text{eff}} = L_w \times W$, W 为有源区的宽度; h_1 为电子在激发态所占比例的初始值; ω_i 是光波频率, $h_1 \omega_i$ 是光子能量。

信号光在 QD-SOA 中传播的光场方程^[8]为

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

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

式中: E^+ 与 E^- 分别是沿正方向与反方向传输的光场强度; z 为光场传输的距离; Γ 是信号光的光场限制因子; g 为材料增益系数; η 是波导的线宽增强因子; α_{int} 是光的损耗系数。

光场方程的边界条件为

$$E_R^+ = (1 - r_1)E_{\text{in}} + r_1E_R^-, \quad (6)$$

$$E_L^- = r_2E_L^+, \quad (7)$$

式中: E_R^+ 、 E_R^- 分别为输入端端面右侧正向传播和反向传播的电场强度; E_L^+ 、 E_L^- 分别为输入端端面左侧正向传播和反向传播的电场强度; r_1 、 r_2 分别

为前端和后端的反射系数。

2.3 PC-QDSOA 的理论模型

PC-QDSOA 的理论模型最早由 Taleb 和 Abedi 建立和设计^[15]。光子晶体对光的约束和控制可以校正 QD-SOA 的非线性、减小其尺寸,从而提高其性能。基于 QD-SOA 的三维受限理论模型,可以得到光子晶体对增益的影响^[5-6]。

光子晶体存在非线性带间效应和非线性带内效应,载流子耗尽(CD)属于带间效应,带内效应包括载流子加热(CH)和光谱烧孔(SHB)。PC-QDSOA 的时间相关增益^[5-6]可表示为

$$\frac{dh_{\text{CD}}(t)}{dt} = \frac{h_0 - h_{\text{CD}}(t)}{\tau_{\text{C}}} - Rv_{\text{g}}h_{\text{PC}}(t) - \{\exp[h_{\text{CD}}(t) + h_{\text{CH}}(t) + h_{\text{SHB}}(t)] - 1\} \frac{P(t)}{E_{\text{sat}}}, \quad (8)$$

$$\frac{dh_{\text{PC}}(t)}{dt} = \frac{LR}{\tau_{\text{C}}}[h_0 - h_{\text{PC}}(t)] - Rv_{\text{g}}h_{\text{CD}}(t), \quad (9)$$

$$\frac{dh_{\text{CH}}(t)}{dt} = -\frac{h_{\text{CH}}(t)}{\tau_{\text{CH}}} - \frac{\epsilon_{\text{CH}}}{\tau_{\text{CH}}}\{\exp[h_{\text{CD}}(t) + h_{\text{CH}}(t) + h_{\text{SHB}}(t)] - 1\}P(t), \quad (10)$$

$$\frac{dh_{\text{SHB}}(t)}{dt} = \frac{h_{\text{SHB}}(t)}{\tau_{\text{SHB}}} - \frac{\epsilon_{\text{SHB}}}{\tau_{\text{SHB}}}\{\exp[h_{\text{CD}}(t) + h_{\text{CH}}(t) + h_{\text{SHB}}(t)] - 1\}P(t) - \frac{dh_{\text{CD}}(t)}{dt} - \frac{dh_{\text{CH}}(t)}{dt}, \quad (11)$$

式中: $h_{\text{CD}}(t)$ 、 $h_{\text{PC}}(t)$ 、 $h_{\text{CH}}(t)$ 、 $h_{\text{SHB}}(t)$ 分别指在载流子耗尽、光子晶体、载流子加热和光谱烧孔作用下 PC-QDSOA 的增益; $h_0 = \ln G_0$, 其中 G_0 为不饱和功率增益; L 为有源区的长度; R 为辐射损耗; v_{g} 为群速度, v_{g} 与 n_{g} 满足 $v_{\text{g}} = c/n_{\text{g}}$, 其中 c 为空间光速, n_{g} 为群指数; $P(t)$ 是输入脉冲功率; E_{sat} 是饱和能量, E_{sat} 是 P_{sat} 与 τ_{C} 的乘积, P_{sat} 是饱和功率, τ_{C} 是载流子寿命; τ_{CH} 是温度弛豫速率; τ_{SHB} 是载流子-载流子散射速率; ϵ_{CH} 与 ϵ_{SHB} 分别是载流子加热和光谱烧孔的非线性增益抑制因子。

PC-QDSOA 的总输出增益^[5-6]可表示为

$$G(t) = \exp[h_{\text{CD}}(t) + h_{\text{CH}}(t) + h_{\text{SHB}}(t)]. \quad (12)$$

PC-QDSOA 的结构示意图如图 2 所示。本模型中有源层使用的半导体材料为 GaInAsP, 量子点在有源层中, 限制层分别为具有较宽带隙的 N 型和 P 型半导体, 光子晶体分布在限制层中, 输入信号从有源层输入, 经此结构得到输出信号^[5-6, 16]。

PC-QDSOA 的静态模型只能模拟直流信号的输出结果, 而模拟交流信号则需要采用动态模型。动态模型采用细化分段模型和四阶龙格-库塔法^[17]求解速率方程, 具体为: 先由细化分段模型[设有源

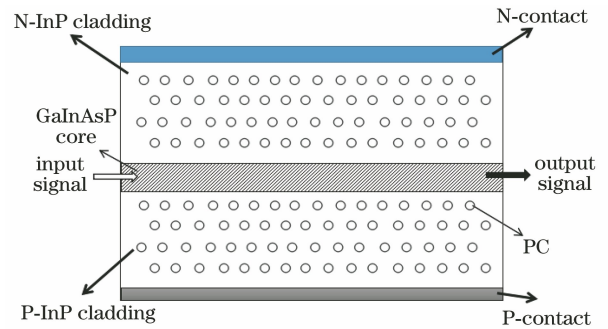


图 2 PC-QDSOA 的结构示意图

Fig. 2 Structural diagram of PC-QDSOA

区分段段数 $M=30$, 第 i ($i=1, 2, \dots, M$) 段的分段数 $N=100$]求得各段的光场强度、电子在浸润层的浓度以及电子在激发态和基态所占的比例, 并以此作为动态模型的初始值; 然后采用随时间变化的高斯波作为输入光信号, 对输入光信号在时间轴上进行分段, 分段步长为

$$dt = \frac{dz}{v_{\text{g}}}, \quad (13)$$

式中: $dz = \frac{L}{M \times N}$ 。

四阶龙格-库塔法是一种单步法, 求解的最高精度可达 $O(h^5)$, 只需要一阶导函数, 根据已知的精度

y_n , 通过单步运算即可求得特定精度 y_{n+1} 。在细化分段后, 利用四阶龙格-库塔法求解速率方程, 得出经 PC-QDSOA 后的波形, 研究其特性。

3 模拟仿真

3.1 工作原理

基于 PC-QDSOA 结构的波长转换工作原理如图 3^[18]所示。泵浦光是带有调制信息且波长为 λ_A 的信号光, 探测光是不带有调制信息且波长为 λ_B 的连续

直流光^[19], 将泵浦光和探测光一起耦合进 PC-QDSOA。泵浦光信号为逻辑低电平“0”时, 几乎没有消耗 PC-QDSOA 中的载流子, 探测光信号得到放大; 而泵浦光信号为逻辑高电平“1”时, PC-QDSOA 中的载流子被大量消耗, 探测光信号不被放大或被饱和吸收, 这样波长为 λ_A 的泵浦光信号和波长为 λ_B 的探测光信号就存在一一对应的关系, 且波形呈极性相反的特点。最后利用光带通滤波器(OBPF)得到波长为 λ_B 的信号, 对其取反后可以得到输入泵浦光信号的信息。

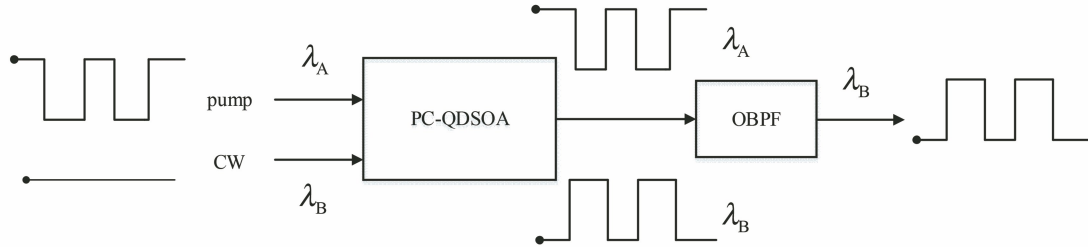


图 3 PC-QDSOA 的波长转换原理图

Fig. 3 Wavelength conversion schematic of PC-QDSOA

3.2 数值运算

文中计算所采用的参数如表 1 所示^[20-22], 对 QD-SOA 进行仿真时用到了 h 、 e 、 c 、 L_w 、 N_Q 、 τ_{w2} 、

τ_{21} 、 τ_{WR} 、 τ_{1R} 、 τ_{12} 、 τ_{2W} 、 η 、 α_{int} 、 r_1 、 r_2 、 v_g 等参数, 引入光子晶体后增加了 R 、 E_{sat} 、 τ_C 、 τ_{CH} 、 τ_{SHB} 、 ϵ_{CH} 、 ϵ_{SHB} 等参数。

表 1 PC-QDSOA 的参数选取表

Table 1 Parameter selection table of PC-QDSOA

Parameter	Description	Value
h	Planck constant	$6.626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}^{-1}$
e	Electron charge	$1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$
c	Light speed in vacuum	$2.99792458 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$
L_w	Effective thickness of active layer	$0.2 \mu\text{m}$
N_Q	Surface density of QDs	$5 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$
τ_{w2}	Electron relaxation time from WL to ES	3 ps
τ_{21}	Electron escape time from ES to WL	0.16 ps
τ_{WR}	Spontaneous radiative lifetime in WL	2 ns
τ_{1R}	Spontaneous radiative lifetime in GS	0.4 ns
τ_{12}	Electron escape time from GS to ES	1 ps
τ_{2W}	Electron escape time from ES to WL	1 ns
η	Line width enhancement factor	0.1
α_{int}	Loss coefficient of light	320
r_1	The first facet reflectivity	0
r_2	The second facet reflectivity	0
v_g	Group velocity of light	$10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$
R	Radiation loss	0.001 cm^{-1}
E_{sat}	Saturation energy	0.07 pJ
τ_C	Carrier lifetime	20 ps
τ_{CH}	Temperature relaxation rate	0.3 ps
τ_{SHB}	Carrier-carrier scattering rate	0.1 ps
ϵ_{CH}	CH nonlinear gain suppression factor	0.02 W^{-1}
ϵ_{SHB}	SHB nonlinear gain suppression factor	0.02 W^{-1}

图 4 是泵浦光和探测光的输入波形图以及经 PC-QDSOA 波长转换后的输出波形图,输入的泵浦光波长为 1500 nm,输入的探测光波长为 1550 nm^[23]。通过对比可知,经 PC-QDSOA 波长

转换后,泵浦光和探测光的波形是反相的,这是由交叉增益调制机制决定的,且泵浦光和探测光都得到了放大。

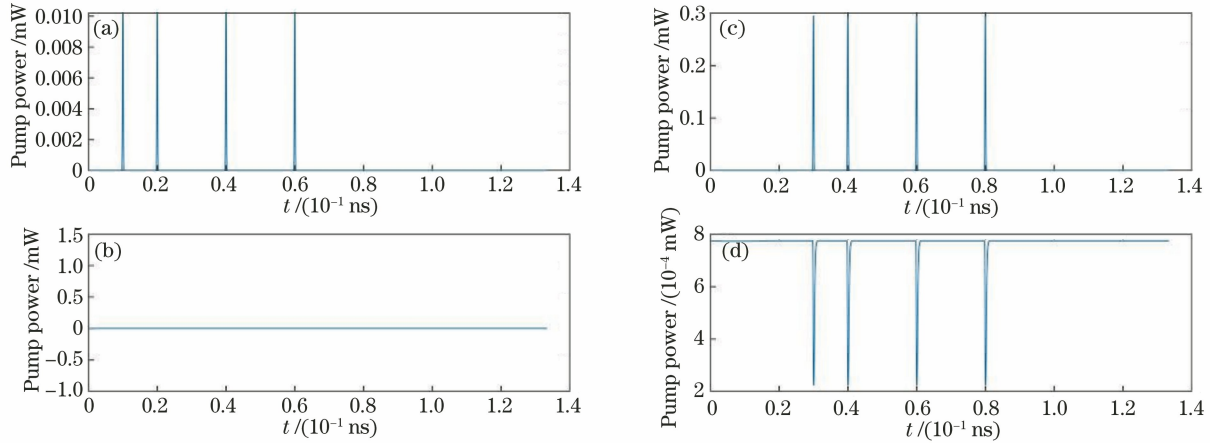


图 4 PC-QDSOA 波长转换的输入与输出波形图。(a)输入的泵浦光波形图;(b)输入的探测光波形图;(c)输出的泵浦光波形图;(d)输出的探测光波形图

Fig. 4 Input and output waveforms of PC-QDSOA for wavelength conversion. (a) Input pump light waveform; (b) input probe light waveform; (c) output pump light waveform; (d) output probe light waveform

3.3 基于光子晶体的量子点半导体光放大器波长转换的 Q 因子特性

在波长转换系统中,Q 因子是关键指标,它决定了信号传输过程中传输的有效性和可靠性,用于衡量转换信号的质量^[24]。Q 因子定义为

$$Q = \frac{\bar{P}_1 - \bar{P}_0}{\sigma_1 + \sigma_0}, \quad (14)$$

式中: \bar{P}_1 和 \bar{P}_0 分别是输出转换光为逻辑高电平“1”和逻辑低电平“0”时的平均功率; σ_1 和 σ_0 分别是输出转换光为逻辑高电平“1”和逻辑低电平“0”时的标准方差。Q 因子的数值越大,代表信号传输过程中传输的有效性和可靠性越高,输出信号的质量越好。

图 5 为最大模式增益与 Q 因子的关系,从图中可以看出,当最大模式增益从 1000 增加到 3000 时,Q 因子逐渐降低,当最大模式增益 g_{\max} 值为 1000 时,PC-QDSOA 与 QD-SOA 的 Q 因子值分别为 12.74 dB 和 9.45 dB,而当最大模式增益 g_{\max} 值为 3000 时,PC-QDSOA 与 QD-SOA 的 Q 因子值分别为 9.91 dB 和 8.92 dB,两者之间的差值由 3.29 dB 减小到 0.99 dB,这是因为:随着最大模式增益值的增加,PC-QDSOA 中的光增益也在逐步增大,这提高了有源区中载流子与光子发生辐射的概率,致使基态中的载流子不能得到快速补充,Q 因子减小。

图 6 为泵浦光功率与 Q 因子的关系,从图中可

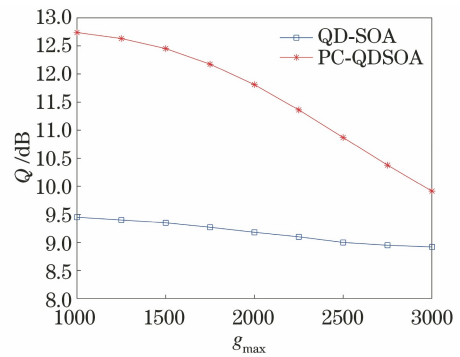


图 5 最大模式增益与 Q 因子的关系

Fig. 5 Relationship between maximum mode gain and Q factor

以看出,当泵浦光功率从 5 dBm 增加到 15 dBm 时,Q 因子逐渐降低,当泵浦光功率 P_1 值为 5 dBm 时,PC-QDSOA 与 QD-SOA 的 Q 因子值分别为 8.24 dB 和 6.30 dB,而当泵浦光功率 P_1 值为 15 dBm 时,PC-QDSOA 与 QD-SOA 的 Q 因子值分别为 5.98 dB 和 5.30 dB,两者之间的差值由 1.94 dB 减小到 0.68 dB,这是因为随着泵浦光功率的增大,PC-QDSOA 探测光的光增益逐渐减小,增益差随之减小,Q 因子减小。

图 7 为探测光功率与 Q 因子的关系,从图中可以看出,当探测光功率从 -8 dBm 增加到 8 dBm 时,Q 因子逐渐变大,当探测光功率 P_2 值为 -8 dBm 时,PC-QDSOA 与 QD-SOA 的 Q 因子值

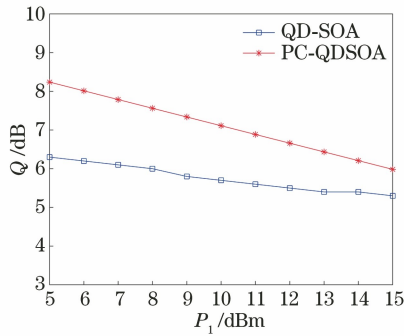


图 6 泵浦光功率与 Q 因子的关系

Fig. 6 Relationship between pump power and Q factor

分别为 8.31 dB 和 8.00 dB,而当探测光功率 P_2 值为 8 dBm 时,PC-QDSOA 与 QD-SOA 的 Q 因子值分别为 12.40 dB 和 10.80 dB,两者之间的差值由 0.31 dB 增加到 1.60 dB,PC-QDSOA 的 Q 因子增加的幅度更大,这是因为增加探测光功率,输出信号中逻辑高电平“1”与逻辑低电平“0”之间的增益差差值变大,Q 因子随之变大。

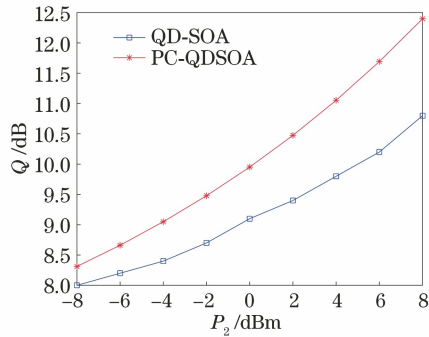


图 7 探测光功率与 Q 因子的关系

Fig. 7 Relationship between probe power and Q factor

图 8 为有源区长度 L 与 Q 因子的关系,当有源区长度从 1.2 mm 增加到 2.0 mm 时,Q 因子逐渐变大,这是因为增加有源区长度,有源区内光子的瞬时储存量增大,致使载流子与光子发生辐射的概率

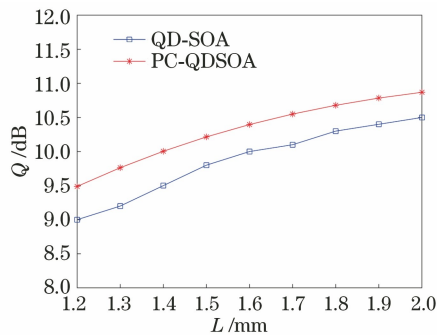


图 8 有源区长度与 Q 因子的关系

Fig. 8 Relationship between length of active region and Q factor

变高,光增益增大,Q 因子随之变大。

从最大模式增益、泵浦光功率、探测光功率、有源区长度 4 个因素与 Q 因子的关系图可以看出,PC-QDSOA 的 Q 因子数值都大于 QD-SOA,所以 PC-QDSOA 的输出信号质量更好,信号传输效率更高。

3.4 基于光子晶体的量子点半导体光放大器波长转换的消光比特性

在波长转换系统中,信号的消光比(ER)是影响通信质量的一个重要因素^[25],用它来说明系统的敏感性及鲁棒性。消光比的定义为

$$R_{ER} = 10 \lg \frac{\bar{P}_1}{\bar{P}_0}, \quad (15)$$

R_{ER} 的数值越大,代表系统的抗敏感性和鲁棒性越好。

图 9 为注入电流与消光比的关系,从图中可以看出,当注入电流从 20 mA 增加到 90 mA 时,消光比逐渐变大,这是因为随着注入电流的增大,产生的电子-空穴对增多,载流子浓度增大,光增益随之变大,消光比增大,且 PC-QDSOA 的消光比 ER 要比 QD-SOA 的大,特别是当注入电流为 90 mA 时,PC-QDSOA 与 QD-SOA 的消光比 ER 值分别为 2.714 dB 和 2.699 dB,差值为 0.015 dB。

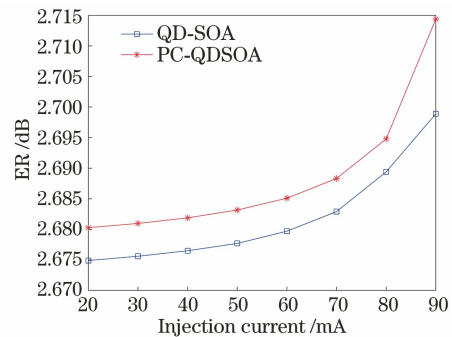


图 9 注入电流与消光比的关系

Fig. 9 Relationship between injection current and extinction ratio

图 10 为泵浦光功率与消光比的关系,从图中可以看出,当泵浦光功率从 5 dBm 增加到 15 dBm 时,消光比逐渐变大,这是因为泵浦光功率的增大,加大了输出信号中逻辑高电平“1”与逻辑低电平“0”之间的增益差差值,消光比随之增大。

图 11 为探测光功率与消光比的关系,从图中可以看出,当探测光功率从 -8 dBm 增加到 8 dBm 时,消光比逐渐降低,这是因为增大探测光功率,有源区内的载流子被加速消耗,载流子浓度降低,致使

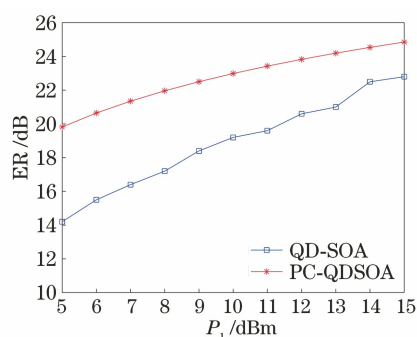


图 10 泵浦光功率与消光比的关系

Fig. 10 Relationship between pump power and extinction ratio
输出信号中逻辑高电平“1”与逻辑低电平“0”获得的增益都下降,且逻辑高电平“1”信号增益下降的幅度大于逻辑低电平“0”,消光比减小;当探测光功率 P_2 值为 -8 dBm 时,PC-QDSOA 与 QD-SOA 的消光比值分别为 30.81 dB 和 27.20 dB,而当探测光功率 P_2 值为 8 dBm 时,PC-QDSOA 与 QD-SOA 的消光比值分别为 25.51 dB 和 11.80 dB,两者之间的差值由 3.61 dB 增加到 13.71 dB,PC-QDSOA 的消光比的下降幅度较缓。

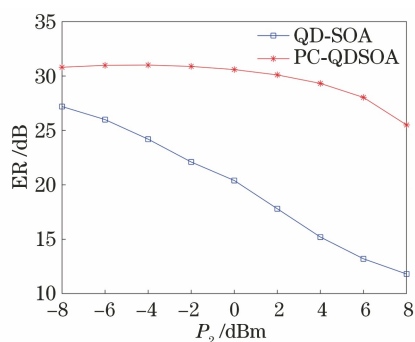


图 11 探测光功率与消光比的关系

Fig. 11 Relationship between probe power and extinction ratio

图 12 为有源区长度与消光比的关系,从图中可以看出,当有源区长度从 1.2 mm 增加到 2.0 mm

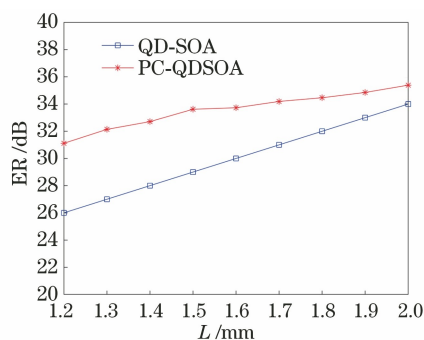


图 12 有源区长度与消光比的关系

Fig. 12 Relationship between length of active region and extinction ratio

时,消光比逐渐变大,这是因为增加有源区长度,有源区内光子的瞬时储存量增大,致使载流子与光子发生辐射的概率增加,光增益增大,探测光获得较大的增益,从而表现出消光比的增大。

从注入电流、泵浦光功率、探测光功率、有源区长度 4 个因素与消光比的关系图可以看出,PC-QDSOA 的消光比数值大于 QD-SOA,所以 PC-QDSOA 的输出信号质量更好,抗敏感性强于 QD-SOA,鲁棒性也更好。

4 结 论

研究了 PC-QDSOA 的波长转换特性,详细分析了 PC-QDSOA 外部参数的改变对 Q 因子和消光比的影响,并将仿真结果与 QD-SOA 进行对比。结果显示:通过提高探测光功率、增大有源区长度、减小最大模式增益、降低泵浦光功率均可以提高 Q 因子的数值;通过增大注入电流、提高泵浦光功率、增加有源区长度、降低探测光功率均可以增大变换光消光比的数值。结果表明 PC-QDSOA 的 Q 因子和消光比的数值总是大于 QD-SOA,这说明 PC-QDSOA 比 QD-SOA 的输出信号质量更好,信号传输效率更高,转换性能更优越。

参 考 文 献

- [1] Contestabile G, Maruta A, Sekiguchi S, et al. All-optical wavelength multicasting in a QD-SOA [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2011, 47(4): 541-547.
- [2] Zhao X F, Pan S L, Yang Y F, et al. All-optical wavelength conversion based on semiconductor optical amplifier and delay interferometer [J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(4): 892-896.
赵晓凡, 潘时龙, 杨彦甫, 等. 基于半导体光放大器结合延迟干涉仪的全光波长转换 [J]. 光学学报, 2009, 29(4): 892-896.
- [3] Contestabile G. Ultra-broadband, highly efficient coherent wavelength conversion in quantum dot SOA [C]//2013 IEEE Photonics Conference, September 8-12, 2013, Bellevue, WA, USA. New York: IEEE Press, 2013: 525-526.
- [4] 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.
- [5] Kotb A, Zoiros K E, Guo C L. 160 Gb/s photonic crystal semiconductor optical amplifier-based all-optical logic NAND gate [J]. Photonic Network Communications, 2018, 36(2): 246-255.

- [6] Kotb A, Zoiros K E, Guo C L. Ultrafast performance of all-optical AND and OR logic operations at 160 Gb/s using photonic crystal semiconductor optical amplifier[J]. *Optics & Laser Technology*, 2019, 119: 105611.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] Shi S S, Wang H L, Gong Q, et al. Refined sectionalized method of QD-SOA[J]. *Optik*, 2014, 125(1): 504-507.
- [10] Yang W H, Wang H L, Wang Z X, et al. Wavelength conversion efficiency of quantum dot semiconductor optical amplifier [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(4): 0406005.
杨文华, 王海龙, 王兆翔, 等. 量子点半导体光放大器的波长转换效率[J]. *光学学报*, 2017, 37(4): 0406005.
- [11] Mi S C, Wang H L, Zhang S Y, et al. Research of all-optical NAND gates based on quantum dot semiconductor optical amplifiers cascaded connection XGM and XPM[J]. *Optik*, 2020, 202: 163551.
- [12] Huang D X, Zhang X L, Huang L R. Semiconductor optical amplifiers and its applications [M]. Beijing: Science Press, 2012: 114-115.
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: 114-115.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] Taleb H, Abedi K. Modeling and design of photonic crystal quantum-dot semiconductor optical amplifiers [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2014, 61(7): 2419-2426.
- [16] Dutta N K, Wang Q. Semiconductor optical amplifiers[M]. 2nd ed. Singapore: World Scientific, 2013.
- [17] Kincaid D, Cheney W. Numerical analysis [M]. Wang G R, Yu Y M, Xu Z L, Transl. Beijing: China Machine Press, 2005: 46-52.
David Kincaid, Ward Cheney. 数值分析 [M]. 王国荣, 俞耀明, 徐兆亮, 译. 北京: 机械工业出版社, 2005: 46-52.
- [18] Nielsen M L, Mørk J, Suzuki R, et al. Experimental and theoretical investigation of the impact of ultrafast carrier dynamics on high-speed SOA-based all-optical switches[J]. *Optics Express*, 2006, 14(1): 331-347.
- [19] Xie T Y, Wang J, Ma C, et al. Research on phase noise suppression of optoelectronic oscillator using semiconductor optical amplifier [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(12): 1223007.
谢田元, 王菊, 马闯, 等. 基于半导体光放大器的光电振荡器相位噪声抑制的研究[J]. *光学学报*, 2019, 39(12): 1223007.
- [20] Cleary C S, Power M J, Schneider S, et al. Fast gain recovery rates with strong wavelength dependence in a non-linear SOA [J]. *Optics Express*, 2010, 18(25): 25726-25737.
- [21] 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.
- [22] Kotb A, Zoiros K E. Performance analysis of all-optical XOR gate with photonic crystal semiconductor optical amplifier-assisted Mach-Zehnder interferometer at 160 Gb/s[J]. *Optics Communications*, 2017, 402: 511-517.
- [23] Contestabile G, Maruta A, Sekiguchi S, et al. Cross-gain modulation in quantum-dot SOA at 1550 nm[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2010, 46(12): 1696-1703.
- [24] Yang W, Zhang M, Ye P D. Analysis of 160 Gb/s all-optical NRZ-to-RZ data format conversion using quantum-dot semiconductor optical amplifiers assisted Mach-Zehnder interferometer [J]. *Optics Communications*, 2009, 282(9): 1744-1750.
- [25] Contestabile G, Presi M, Ciamarella E. Multiple wavelength conversion for WDM multicasting by FWM in an SOA [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2004, 16(7): 1775-1777.