

文章编号: 1001-3806(2016)05-0742-04

基于单端 QD-SOA 波长转换增益恢复特性研究

崔乐乐¹, 王海龙^{1*}, 李雯¹, 张国¹, 龚谦²

(1. 曲阜师范大学 物理工程学院, 曲阜 273165; 2. 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: 为了对单端量子点半导体光放大器(QD-SOA)全光波长转换器的增益恢复特性进行系统分析,采用分段法和4阶龙格-库塔法,利用单端 QD-SOA 的交叉增益调制效应的全光波长转换原理分别求解速率方程和光场方程,分析了注入电流、后端面反射率以及最大模式增益等变化时对单端 QD-SOA 全光波长转换器增益恢复时间的影响。结果表明,当增大注入电流和后端面反射率、减小最大模式增益时,均可以减小增益恢复时间,进而可以通过优化上述参量改善单端 QD-SOA 的增益恢复特性。

关键词: 光通信;量子点半导体光放大器;波长转换;交叉增益调制;增益恢复时间

中图分类号: TN929.11 文献标志码: A doi:10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2016.05.026

Study on gain recovery time of wavelength conversion based on single-port-coupled QD-SOA

CUI Lele¹, WANG Hailong¹, LI Wen¹, ZHANG Guo¹, GONG Qian²

(1. College of Physics and Engineering, Qufu Normal University, Qufu 273165, China; 2. State Key Laboratory of Functional Materials for Informatics, Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China)

Abstract: To explore the gain recovery time of converted signal in detail, rate equations and light field transfer equations were solved based on all-optical wavelength cross-gain modulation (XGM) in a single-port-coupled quantum-dot semiconductor optical amplifier(QD-SOA) by utilizing the segment method and the forth-order Runge-Kutta method. The effects of various parameters, including injection current, rear facet reflectivity and the maximum modal gain on gain recovery time of a single-port-coupled QD-SOA was studied. The results show that the gain recovery time of a single-port-coupled QD-SOA can be decreased by increasing the injected current or rear facet reflectivity and decreasing the maximum modal gain. The low gain recovery time of a single-port-coupled QD-SOA can be achieved by optimizing these parameters.

Key words: optical communication; quantum-dot semiconductor optical amplifier; wavelength conversion; cross-gain modulation; gain recovery time

引言

全光波长转换器(all-optical wavelength converter, AOWC)是一种光电子器件,这种器件在自动交换光网络中波长级交换中有着重要的作用^[1-3]。其中,根据交叉增益调制(cross-gain modulation, XGM)的原理来实现波长转换功能较简单,因此,基于量子点半导体光放

大器(quantum-dot semiconductor optical amplifier, QD-SOA)的交叉增益调制效应波长转换器在波长转换研究方向方面非常受欢迎。相对于其它光学放大器, QD-SOA 有着非常明显的优点,比如:阈值电流低、增益恢复快、噪声指数低、差分增益高和频率带宽大等,而其中快速的增益恢复特性尤为引人注目^[4-6]。与传统的体材料半导体光放大器相比, QD-SOA 的增益恢复时间有明显减小,同时 QD-SOA 的增益恢复时间的减小可以显著提高其响应时间,基于此,通常采用增益恢复时间的长短来衡量 QD-SOA 的动态增益特性。把某一路输入光信号经过 QD-SOA 有源区后,从 QD-SOA 增益稳定值的 10% 恢复到 90% 所需要的时间称之为增益恢复时间^[7]。同时 QD-SOA 用作全光信号处理的码型效应、消光比和可实现的最高工作速率等均

基金项目:山东省自然科学基金资助项目(ZR2014FM011);信息功能材料国家重点实验开放课题资助项目(SK1201307)

作者简介:崔乐乐(1991-),女,硕士研究生,主要研究方向为光通信及光组网。

* 通讯联系人。E-mail: hlwang@mail.qfnu.edu.cn

收稿日期:2015-06-10;收到修改稿日期:2015-07-30

取决于增益恢复时间,因此,研究 QD-SOA 的增益恢复特性至关重要^[7]。

本文中所研究的单端 QD-SOA^[8-10]比普通双端 QD-SOA 具有一定的优越性。单端 QD-SOA 对后端面反射率的优化选择,既可以改善消光比、使增益恢复更快、保证了转换效率,也降低了普通 QD-SOA 对端面反射率的苛刻要求,使制作难度大大降低。本文中在单端 QD-SOA-XGM 的波长转换原理的基础上,重点研究了单端 QD-SOA 的增益恢复特性。

1 工作原理

单端 QD-SOA 全光波长转换原理如图 1 所示。原理图右侧为单端 QD-SOA,它是由抗反射涂层(anti-reflection coating, AR)、QD-SOA 和高反射的涂层(high-reflection coating, HR)构成。光信号的入射口和出射口均是抗反射涂层 AR。当信号光 λ_s 和探测光 λ_c 同向耦合后并通过抗反射涂层进入单端 QD-SOA 中时,单端 QD-SOA 的增益将会达到饱和, λ_c 通过单端 QD-SOA 获得增益并进行调制,当到达 HR 时,大多数信号被反射并按原路返回,并再次进行放大调制。这样 λ_c 通过出射口输出,得到了信号光的信息,且恰好与其是反相的^[11]。相比普通双端 QD-SOA-XGM 波长转换器,其最大优势是:探测光功率获得了双倍增益,这样对于光的放大效果极为有利。

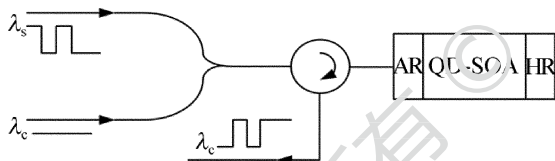


Fig. 1 Schematic diagram of wavelength conversion based on single-port-coupled QD-SOA

2 理论模型

本文中在忽略放大自发辐射(amplified spontaneous emission, ASE)噪声影响、认为单端 QD-SOA 是理想的条件下构建了基于单端 QD-SOA 全光波长转换器理论模型。

在单端 QD-SOA 中,三能级速率方程可以描述浸润层(wetting layer, WL)的载流子浓度变化、激发态(excited state, ES)和基态(ground state, GS)内电子占有率的变化。能级结构图如图 2 所示。该跃迁速率方程^[12]可以表示为:

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

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

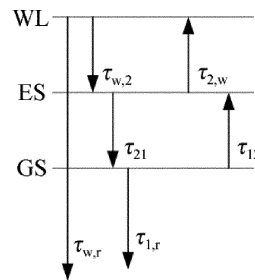


Fig. 2 Energy level structure of QD-SOA

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

式中, N_w 为载流子在浸润层中的浓度, h 为激发态中电子的占有率, f 表示电子在基态中的占有率, L_w 表示有源区厚度, σ 是有源层的横截面积($\sigma = L_w \times W$), W 则是有源区的宽度, J 和 e 分别表示注入电流密度和电子的电量, N_q 表示表面量子点密度, t 表示时间, $\tau_{w,r}$ 和 $\tau_{1,r}$ 分别表示浸润层的自发辐射时间和基态的自发辐射时间, $\tau_{w,2}$ 和 $\tau_{2,w}$ 分别表示电子从浸润层到激发态的跃迁时间和电子从激发态到浸润层的跃迁时间, τ_{21} 和 τ_{12} 分别表示电子从激发态到基态的跃迁时间和电子从基态到激发态的跃迁时间(其中下标 1 是代表基态,下标 2 代表激发态), g_i 表示分段模型的第 i 段的模式增益, P 是输出光的光功率, $h_1 \omega_i$ 表示光子的能量, ω_i 表示光的频率。

光场方程^[13]可以表示为:

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

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

式中, g 是模式增益, z 给出了光场传输方向, E^+ (E^-) 则代表了沿着正(反)方向传输的光场强度, Γ 是光场的限制因子, $j = (-1)^{1/2}$, η 是限宽增强因子, α 则表示光在波导中传输的损耗系数。下面是边界条件^[13]:

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

$$E^-(L) = r_2 E^+(L) \quad (7)$$

式中, r_1 是前端面反射系数, r_2 是后端面反射系数, E_{in} 表示输入光场强度, L 表示有源区长度。

采用分段模型^[14]和 4 阶龙格-库塔法求解上述方程(1)式~(5)式。所谓分段模型就是把 QD-SOA 的有源区均分为 N 小段,图 3 中的 k 即表示分段后的第 k 段,各段长为 $\Delta z = L/N$,各段传输时间为 $\Delta t = \Delta z/c$ (c 是光速),这样就可以近似认为各段的电子占有率均匀分布。4 阶龙格-库塔法是一种单步法,且精度极高,可达精度 $O(h^5)$,数值稳定性好,只需要知道 1 阶

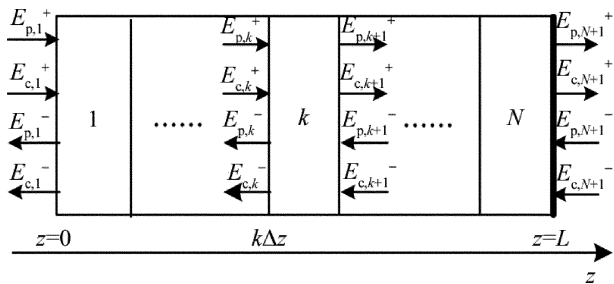


Fig. 3 Segment model of single-port-coupled QD-SOA

导数,不需要明确定义或计算其它高阶导数。

3 数值模拟

本文中数值模拟计算时取分段数 $N = 100$, 注入电流设定为 10mA, 信号光采用 1 阶高斯脉冲模拟信号, 速率设定 160Gbit/s, 脉宽设定 0.24ps, 峰值功率是 10dBm, λ_p 波长是 1500nm, λ_c 波长是 1550nm, 后端面反射率取 $R_2 = 0.01$ 。

单端 QD-SOA 的增益恢复受注入电流的影响, 如图 4 所示。从图中可以明显看出, 二者成反比例关系, 注入电流与载流子的浓度是成正比例关系, 载流子和光子的作用加强, 进而增益得到快速恢复。单端 QD-SOA 的偏置电流为其提供所必需的载流子, 加大电流就是加快了载流子的补充速率。载流子恢复过程, 即受激消耗的载流子得到补充的过程。但是由于功率限制, 载流子消耗的速率也受到限制, 所以当注入电流逐渐增大时, 载流子并没有被及时消耗掉, 载流子达到饱和, 增益恢复不再明显。

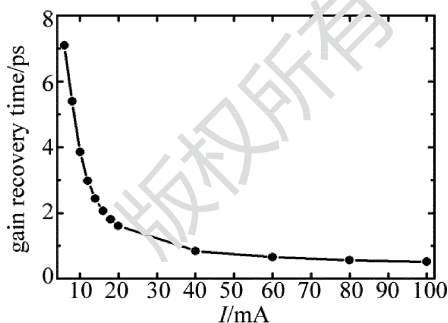


Fig. 4 Relationship between gain recovery time and injected current

根据图 5 可以看出, 后端面反射率越大, 增益恢复越快。前端面镀增透膜, 不容易产生激射, 并且光在单端 QD-SOA 内部被双程放大, 从而增大后端面反射率, 就会使得反射回来的光增加, 导致光子的浓度变大, 光子和载流子直接的作用也相应增强, 这样就加快了增益恢复^[15]。

图 6 则是 τ_{21} 不同时, 增益随时间的变化。由图分析得出, 随着 τ_{21} 的变大, 增益减小, 且增益恢复变慢; 随着 τ_{21} 的增大, 电子的跃迁时间变长, 导致基态被消

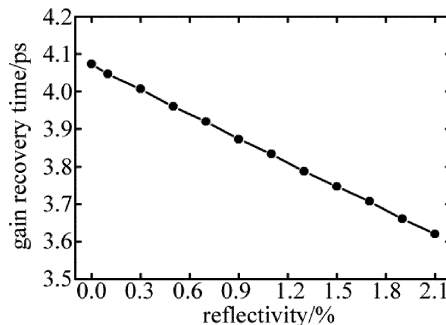


Fig. 5 Relationship between recovery time and rear facet reflectivity

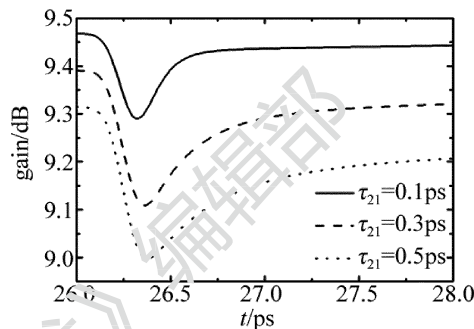


Fig. 6 Relationship between gain recovery time and τ_{21}

耗的电子得不到及时地补充, 受激辐射的电子相应减少, 增益恢复因此就会变慢。

图 7 中给出了 $\tau_{w,2}$ 对增益恢复时间的影响。可以看出, 二者成正比关系。单端量子点半导体光放大器的载流子浓度恢复速率可以通过导带和价带之间的空穴和电子对之间的作用而变快。浸润层相当于量子点的一个载流子库, 保持了量子点中载流子消耗的高供给率。图中两条曲线分别表示普通双端 QD-SOA 和单端 QD-SOA 增益恢复时间随 $\tau_{w,2}$ 的变化趋势。通过二者对比, 可以证明相同条件下, 单端 QD-SOA 增益恢复较普通 QD-SOA 要快。并且随着 $\tau_{w,2}$ 的增大, 这种优势更加明显。

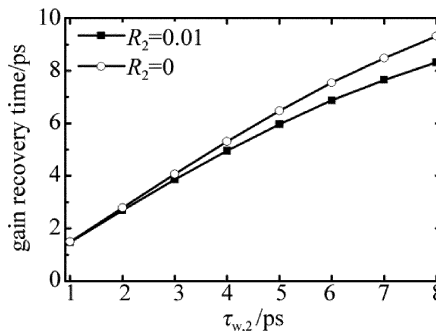


Fig. 7 Relationship between gain recovery time and $\tau_{w,2}$

由图 8 分析得出, 最大模式增益 g_{max} 与增益恢复是成正比的, g_{max} 直接影响模式增益, 而模式增益越大, 载流子浓度变化越慢。将 3 条曲线相对比, 得出相同条件下, 输入信号光功率 P_{in} 与增益恢复也呈正相关, 这是由于高输入功率导致载流子得不到及时恢复,

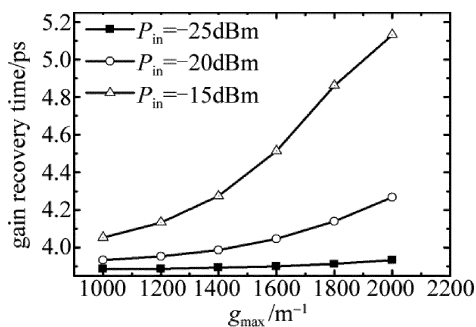


Fig. 8 Relationship between gain recovery time and g_{max}

增益恢复时间也就相应的增大。

4 结论

基于单端 QD-SOA-XGM 的全光波长转换原理,在其动态理论模型的基础上,研究了注入电流、后端面反射率、最大模式增益等参量对增益恢复特性的影响。结果表明,增大注入电流和后端面反射率,以及减小最大模式增益等因素可以改善增益恢复特性。并且对单端 QD-SOA 和普通 QD-SOA 在相同条件下的增益恢复时间进行了对比,实验结果表明,单端 QD-SOA 的增益恢复特性有一定优势。

参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] SHI Sh Sh, WANG H L, SUN L Q, et al. Theoretical study on extinction ratio of wavelength-converted optical signals based on QD-SOA-XGM[J]. Communications Technology, 2013(9):107-110(in Chinese).
- [3] TAO F Y, ZHAN L, YANG X L, et al. Group velocity manipulation of 10Gb/s signal by mutually-modulated cross-gain modulation in semiconductor optical amplifiers[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2014, 26(6): 606-608.
- [4] QASAIMEH O. Optical gain and saturation characteristics of quantum-dot semiconductor optical amplifiers[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2003, 39(6): 793-798.
- [5] WILKINSON S, LINGNAU B, KORN J, et al. Influence of noise on the signal quality of quantum-dot semiconductor optical amplifiers[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2013, 19(4): 1900106.
- [6] SHEN S Q, LING Y, LIAO L D, et al. High pass filter characteristics of saturated quantum dot semiconductor optical amplifiers[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(10):1025001(in Chinese).
- [7] QU Y. The dynamic characteristics of RSOA[D]. Harbin: Heilongjiang University, 2011:29-34(in Chinese).
- [8] LI P L, HUANG D X, ZHANG X L, et al. Wavelength converter based on cross-gain modulation in multi-electrode single-port-coupled semiconductor optical amplifier[J]. Acta Physica Sinica, 2006, 55(6):2746-2750(in Chinese).
- [9] GUO Q, TRAN A V. Performance enhancement in RSOA-based WDM passive optical networks using level coding[J]. Journal of Lightwave Technology, 2013, 31(1):67-73.
- [10] JIN X Q, GROENEVAARD J, HUGUES-SALAS E, et al. Upstream power budgets of WDM optical OFDMA PONs incorporating RSOA intensity modulator-based colorless ONUs[J]. Journal of Lightwave Technology, 2013, 31(12): 1914-1920.
- [11] DONG J, ZHANG X L, WANG Y, et al. Extinction ratio characteristics of wavelength converters based on single-port-coupled SOA[J]. Laser Technology, 2005, 29(1):14-17(in Chinese).
- [12] LI X X, LI G F. Comments on "Theoretical analysis of gain-recovery time and chirp in QD-SOA"[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2006, 11(18):2434-2435.
- [13] YU Y, HUANG L R, XIONG M, et al. Enhancement of gain recovery rate and cross-gain modulation bandwidth using a two-electrode quantum-dot semiconductor optical amplifier[J]. Journal of the Optical Society of America, 2010, B27(11):2211-2217.
- [14] LIU S, WANG H L, CHEN T T. Impact of facet reflectivity on single-port coupled SOA[J]. Communications Technology, 2015, 48(2):161-164(in Chinese).
- [15] HUANG D X, ZHANG X L, HUANG L R. Semiconductor optical amplifiers and their applications[M]. Beijing: Science Press, 2012: 139-141(in Chinese).