

doi:10.3788/gzxb20184701.0125003

增益饱和反射型量子点半导体光放大器高通特性

尹雨¹, 凌云¹, 李浩¹, 杜晓君¹, 邱昆¹, 郑勉²

(1 电子科技大学 光纤传感与通信教育部重点实验室, 成都 610054)

(2 西南石油大学 电气信息学院, 成都 610500)

摘 要:反射型量子点半导体光放大器(R-QDSOA)相较于传统 RSOA 具有皮秒级的载流子恢复速率和几十 GHz 的调制带宽, 将其应用在高速的波分复用无源光网络(WDM-PON)中具有巨大的潜力. 根据 R-QDSOA 的载流子速率方程和光场传输方程, 建立了 R-QDSOA 的仿真模型, 对其在增益饱和情况下的高通特性进行研究. 研究结果表明: 通过增加输入光功率、最大模式增益、有源区长度和减小注入电流, 可提高最大信号增益和 3 dB 截止频率; 通过合理的参数设置, R-QDSOA 的 3 dB 截止频率可高达 10GHz 以上. 该研究在无色 WDM-PON 的再调制方面展现了巨大的优势, 并对提高 R-QDSOA 调制带宽具有理论指导意义.

关键词:光电子学; 无源光网络; 速率方程; 反射型量子点半导体光放大器; 高通滤波; 增益饱和; 带宽; 无色

中图分类号: TN365

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2018)01-0125003-8

High-pass Properties of Gain Saturation Reflective Quantum Dot Semiconductor Optical Amplifier

YIN Yu¹, LING Yun¹, LI Hao¹, DU Xiao-jun¹, QIU Kun¹, ZHENG Mian²

(1 Key Laboratory of Fiber Sensing and Communications of Ministry of Education, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, 610054, China)

(2 School of Electrical Engineering and Information, Southwest Petroleum University, Chengdu, 610500, China)

Abstract: Compared to traditional RSOA, the reflective quantum dot semiconductor optical amplifier (R-QDSOA) has the picosecond carrier recovery rate and the modulation bandwidth of dozens of GHz. It is reveal that R-QDSOA has a great application prospect in high-speed WDM-PON. The simulation model of R-QDSOA is built according to the carrier rate equations and the light field transmission equations. And then the high-pass properties under the condition of gain saturation are investigated. The results show that the maximum signal gain and 3dB cutoff frequency can be improved by increasing the input optical power, maximum mode gain, active area length and reducing the injection current; the 3dB cutoff frequency of the R-QDSOA can achieve larger than 10GHz with reasonable parameter. This research makes R-QDSOA a promising candidate for re-modulation scheme of colorless WDM-PON and has theoretical significance for improving the modulation bandwidth of R-QDSOA.

Key words: Optoelectronics; Passive optical networks; Rate equations; Reflective quantum-dot semiconductor optical amplifier; High-pass filters; Gain saturation; Bandwidth; Colorless

OCIS Codes: 250.5590; 250.5980; 060.2630

0 引言

WDM-PON 相比于 TDM-PON 具有对称的上下行带宽、较低的光功率损耗和高效透明的协议等优点,

基金项目:国家自然科学基金(No. 61505021)、中央高校基本科研业务费(No. ZYGX2016J014)和四川省教育厅自然科学基金项目(No. 15ZB0063)资助

第一作者:尹雨(1993—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为光信息处理. Email: yilian_2017@126.com

导师(通讯作者):凌云(1979—), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为光纤通信. Email: yling@uestc.edu.cn

收稿日期:2017-06-15; **录用日期:**2017-08-28

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

是一种高性能的光接入网络. 但为每个 ONU 节点配置不同波长的半导体激光器, 将极大地提高系统复杂性和成本, 限制了 WDM-PON 的发展^[1]. 在无色 WDM-PON 中, ONU 利用反射型半导体光放大器 (Reflective Semiconductor Optical Amplifier, RSOA) 在增益饱和时的高通滤波特性擦除下行信号; 同时进行上行信号的再调制^[2], 可支持超过 30nm 宽度的工作波段, 实现了 ONU 的配置与波长无关. 然而传统 RSOA 受限于载流子恢复时间(大约几百皮秒), 调制带宽一般在 0.6~3.2GHz^[3], 限制了上行速率的传输. 国内外主要研究重点是如何基于 RSOA 小的调制带宽下还能实现 10Gbit/s 的传输速率. 目前有以下几种解决方式, 均衡技术^[4]、FEC (Forward Error Correction) 纠错机制^[5] 和高阶调制^[6]. 用均衡技术实现 10Gbit/s 的上行传输速率需要超高速计算的芯片, 这在某种程度上加大了系统的成本. 而用 FEC 实现 10Gbit/s 的上行传输速率, 虽然它可以纠正由高速传输产生的误码率, 但是这会增加系统的复杂度. 同样地, 使用高阶调制格式也会因为增加一些光器件而加重系统的复杂度.

量子点半导体光放大器 (Quantum Dot Semiconductor Optical Amplifier, QDSOA) 具有皮秒量级的增益恢复时间^[7-8], 可实现 80Gbps 以上的信号放大^[9], 调制带宽远大于 RSOA, 适合高速的光信号处理^[10]; 同时, 其在增益饱和的情况下也具有高通滤波特性^[11]. 因此采用反射型 QDSOA (Reflective Quantum Dot Semiconductor Optical Amplifier, R-QDSOA) 代替反射型体结构和量子阱 SOA 具有提高上行传输速率的巨大优势. 本文着力于对 R-QDSOA 的高通频响特性进行研究, 分析了影响 3dB 截止频率的因素, 为 R-QDSOA 在无色 WDM-PON 中擦除下行信号的应用提供依据.

1 工作原理与仿真模型

1.1 工作原理

在无色 WDM-PON 的 ONU 中采用 R-QDSOA 代替 RSOA 的系统框图如图 1(a) 所示. 光线路终端 (Optical Line Terminal, OLT) 产生下行信号 (Down Signal, DS), 经过波导阵列光栅 (Arrayed Waveguide Grating, AWG) 复用和解复用分配给每个 ONU, 然后由分光器分成两部分, 一部分用于接收, 一部分用于

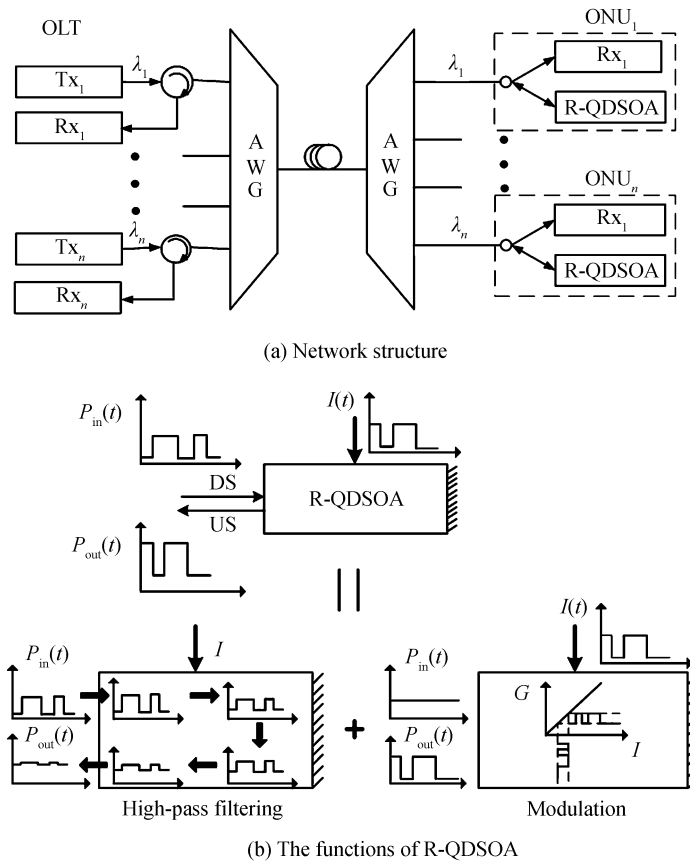


图 1 基于 R-QDSOA 的无色 WDM-PON 系统框图
Fig.1 The schematic of the colorless WDM-PON based on R-QDSOA

上行信号(Up signal, US)的再调制,最后经 R-QDSOA 调制后的信号返回至 OLT,因此在 ONU 端不需要配置光源,节约了成本. R-QDSOA 对 DS 进行再调制的功能等价于对下行光信号进行高通滤波,擦除下行信号和对上行信号进行光调制两个子功能,具体过程如图 1(b)所示. 本文主要对 R-QDSOA 的高通特性进行研究.

1.2 R-QDSOA 理论模型

通常可将 R-QDSOA 的仿真模型简化为浸润层(Wetting Layer, WL)、激发态(Excited State, ES)和基态(Ground State, GS)三个能级^[12-13],电子在三能级系统中浓度和占据几率的速率方程为^[14]

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

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

$$\frac{\partial f}{\partial t} = \frac{h(1-f)}{\tau_{21}} - \frac{f(1-h)}{\tau_{12}} - \frac{f^2}{\tau_{1R}} - \frac{L_w g P}{N_Q \sigma \hbar \omega} \quad (3)$$

式中, N_w 、 h 、 f 分别为电子在 WL 中的浓度、ES 和 GS 中的占据几率, τ_{w2} 是电子从 WL 到 ES 的跃迁时间, τ_{2w} 是电子从 ES 到 WL 的跃迁时间, τ_{wR} 是电子在 WL 的自发辐射时间, τ_{21} 是电子从 ES 到 GS 的跃迁时间, τ_{12} 是电子从 GS 到 ES 的跃迁时间, τ_{1R} 是电子在 GS 自发辐射时间, P 为输入信号光功率, L 、 W 、 L_w 分别为有源层的长度、宽度和厚度, J 为注入电流面密度, $J = I/(L \times W)$, 其中 I 为注入电流, σ 为有源层的横截面积, $\sigma = L_w \times W$, N_Q 为量子点的表面密度, e 为电子电量, t 为时间, $\hbar \omega$ 为光子能量, g 为模式增益, $g = g_{\max}(2f-1)$, g_{\max} 为最大模式增益, 包含了光场限制因子的影响.

R-QDSOA 中的光场可描述为

$$\frac{dE_s^+(z)}{dz} = \frac{1}{2}[-\alpha + (1-j\alpha_H)g]E_s^+(z) \quad (4)$$

$$\frac{dE_s^-(z)}{dz} = \frac{1}{2}[\alpha - (1-j\alpha_H)g]E_s^-(z) \quad (5)$$

式中, $E_s^+(z)$ 为沿 z 正向传播光的电场强度, $E_s^-(z)$ 为沿 z 反向传播光的电场强度, α 为损耗系数, α_H 为线宽增强因子, g 为模式增益, $j = (-1)^{1/2}$.

RQDSOA 仿真采用的分段模型如图 2 所示,前端面反射率 R_1 为 0, 后端面反射率 R_2 为 1, 将长度为 L 的有源区平均分为 Z 段(仿真中 Z 取 1000 段), 每段长度为 $dz = L/Z$, 光在各段的传输时间为 $dt = dz/v_g$, 其中 v_g 为光群速度. 利用 dz 进行空间采样, dt 进行时间采样, 采用牛顿迭代法进行初始值的计算和四阶龙格库塔法进行动态计算^[15].

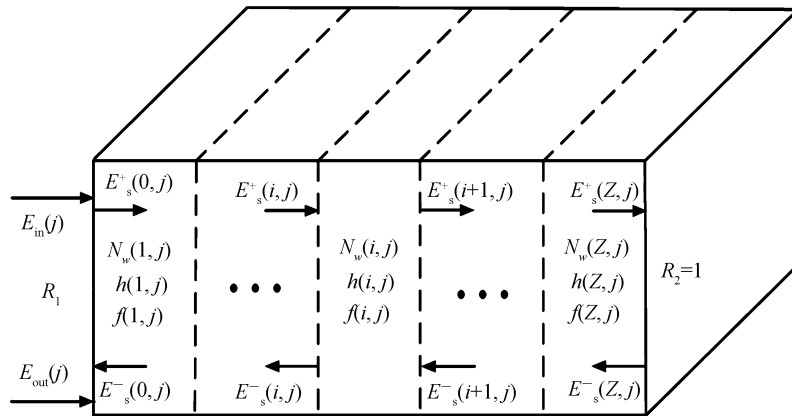


图 2 R-QDSOA 分段模型
Fig.2 Section model of R-QDSOA

1.3 测试方法与仿真参数

为了研究 R-QDSOA 在增益饱和状态下对强度调制(Intensity Modulation, IM)信号的高通频响特性, 输入光信号采用正弦波调制格式, 光信号功率表达式为

$$P_{in}(t) = P_0(1 + m \sin 2\pi ft) \quad (6)$$

式中, P_0 为直流光功率, f 为调制频率, m 为调制系数.

通过扫描输入光信号调制频率, 可得到对应频率输出光信号的调制幅度. 调制光信号的增益 G 定义为输出光信号与输入光信号调制幅度的比值, 如图 3 所示, 其表达式为

$$G(f) = 10 \lg [A_{out}(f) / A_{in}(f)] \quad (7)$$

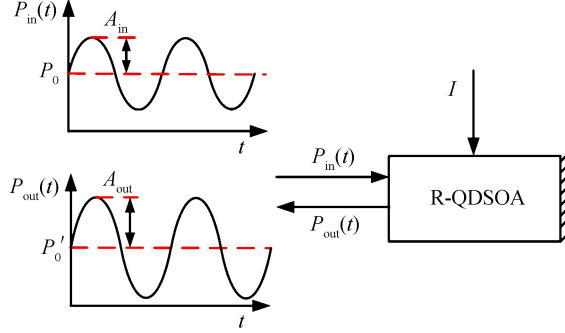


图 3 R-QDSOA 的测试方法
Fig.3 Test method of R-QDSOA

本文采用 3 dB 截止频率, 即光信号增益值相比于最大光信号增益下降 3 dB 对应的频率, 对信号增益曲线 $G(f)$ 进行评估. 需要说明的是, 电信号增益 $G_E(f) = 20 \lg (S_{out}/S_{in}) = 2G(f)$ (探测器响应度和光电转换器转换效率均为理想值 1).

仿真中采用主要参数如表 1 所示.

表 1 仿真参数
Table 1 The simulation parameters

Parameters	Values
Electron relaxation time from wetting layer τ_{w2} /ps	3
Spontaneous radiative lifetime in WL τ_{wR} /ns	0.2
Electron relaxation time from ES to GS τ_{21} /ps	0.16
Electron escape time from ES to WL τ_{2w} /ns	1
Electron escape time from GS to ES τ_{12} /ps	1.2
Spontaneous radiative lifetime in GS τ_{1R} /ns	0.4
Surface density of QDs N_Q /m ⁻²	5×10^{14}
Length of active layer L /mm	2
Effective thickness of active layer L_w / μ m	0.25
Width of active layer W / μ m	3
Injection current I /mA	20
Maximum modal gain g_{max} /m ⁻¹	2100
Linewidth enhancement factor α_H	0.1
Waveguide loss α /m	200
The first facet reflectivity R_1	0
The second facet reflectivity R_2	1
Modulation index m	0.2

2 仿真结果与讨论

2.1 端面反射率对于 R-QDSOA 的影响

图 4(a) 为有源区长度为 2 mm 的 R-QDSOA ($R_2 = 1$) 和有源区长度为 4 mm 的 TW-QDSOA ($R_2 = 0$) 在相同输入光功率为 0.075 mW、相同注入电流为 20 mA (R-QDSOA 和 TW-QDSOA 电流密度 J 分别为 3.3×10^6 A/m² 和 1.7×10^6 A/m²) 的信号增益曲线. R-QDSOA 的 3 dB 截止频率为 10.33 GHz, 高于 TW-QDSOA 的 3 dB 截止频率 9.03 GHz. R-QDSOA 的最大信号增益略高于 TW-QDSOA. 文献[11]研究了增

益饱和和行波量子点半导体光放大器(TW-QDSOA)的高通滤波特性,在 TW-QDSOA 中由于光场单向传输,有源区中光功率随着传播长度指数增大,导致载流子浓度分布不均匀,输出端增益饱和深度远大于输入端.而在 R-QDSOA 中,由于光场的往返传输,不仅可以对光信号进行两次放大,而且增益饱和和深度分布也更加均匀,因此在相同条件下 R-QDSOA 具有更高的调制带宽.

图 4(b)为 R-QDSOA 在不同调制频率下的输出波形图,分别对应图 4(a)中的 A、B 和 C 三个点,对比三者的输出波形可以知道在不同频率下,输入光信号获得的增益不同,因此可以用于抑制低频信号,放大高频信号.图 4(c)和(d)分别为调制频率 $f=5\text{ GHz}$ 和 $f=50\text{ GHz}$ 时的归一化功率的输入输出波形图,从图中可以知道当信号处于低频部分时,失真更明显,这是由于低频部分信号变化缓慢,在相同的时间下消耗载流子多而且来不及会恢复,导致增益饱和程度高,获得增益小,波形畸变也越严重.从图 4(c)可以看出输出信号的前沿变陡,后沿变缓,这是由于在输入信号前沿,载流子浓度大,获得增益大,当输入信号后沿到来时,载流子浓度来不及恢复,造成饱和增益程度大,增益较小,使得输出信号后沿具有较长的拖尾.

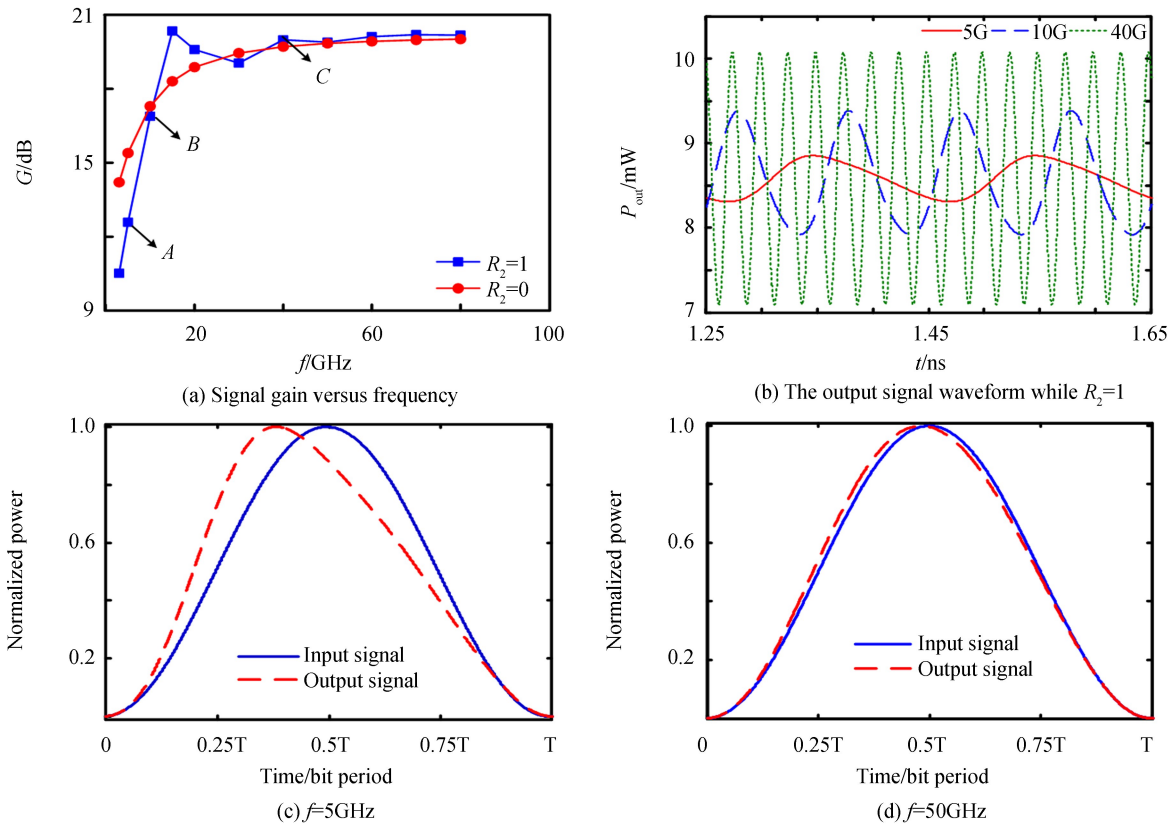


图 4 端面反射率对增益频响的影响、不同频率下的输出波形和归一化功率的输入输出波形图

Fig.4 Impacts of the facet reflectivity on gain frequency response, the output signal waveform at different frequency and the normalized input and output waveform

2.2 输入光功率对于 R-QDSOA 的影响

当调制频率小于 10 GHz 时,随着调制频率的增加信号增益迅速上升,当调制频率大于 20 GHz 时,信号增益逐渐趋于稳定,并且高频稳定区域较宽,如图 5(a)所示.随着输入光功率的增加,载流子的消耗会增加,当载流子消耗速率大于供给时,信号增益将会减小,增益饱和程度增大,饱和高通效应增强,所以 3 dB 截止频率增大.图 5(b)为 3 dB 截止频率与输入光功率的关系, 3 dB 截止频率随着输入光功率的增幅低于线性增幅变化,即随着光功率的增加, 3 dB 截止频率增大的幅度将变小,这是由于输入功率较大时,载流子恢复速率已经跟不上消耗速率,进入深度增益饱和,所以 3 dB 截止频率将会增加缓慢.

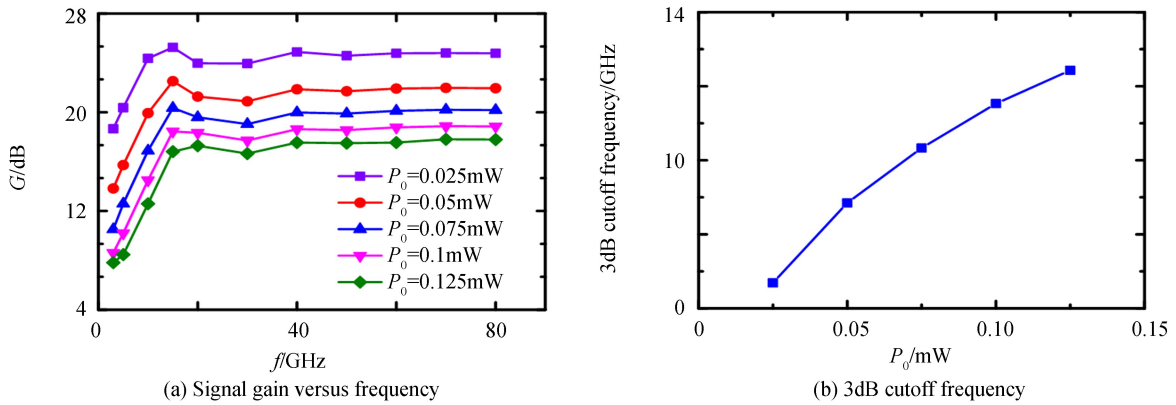


图 5 输入光功率对增益频响的影响

Fig.5 Impacts of input optical power on gain frequency response

2.3 最大模式增益对于 R-QDSOA 的影响

从图 6(a)可知,在高频区域, g_{\max} 的变化对信号增益的影响较小,信号增益接近 20 dB,由上文模式增益公式 $g = g_{\max}(2f-1)$ 可知,虽然 g_{\max} 增大,但输入光信号速率大,消耗载流子过快,使得载流子浓度下降和电子在 GS 的占据几率下降,因此信号增益变化不大;在低频区域,随着 g_{\max} 增大,信号增益减小,主要原因在于随着 g_{\max} 的增大,光信号单位长度获得的增益更大,光信号功率随传播长度的增幅更快,有源区也更快地进入增益饱和,且增益饱和程度更深,因此信号增益会下降.图 6(b)为 3 dB 截止频率随 g_{\max} 的变化曲线.随 g_{\max} 的增加,3 dB 截止频率的变化近似于线性增加,这是因为随着 g_{\max} 的增加,R-QDSOA 进入增益饱和的程度越高,这会使得高通特性更加明显,同时高低频信号增益差也会不断地放大,所以 RQDSOA 高通特性的 3dB 截止频率会增加.当 $g_{\max} = 3\ 000$ 时,3 dB 截止频率可高达 17 GHz.

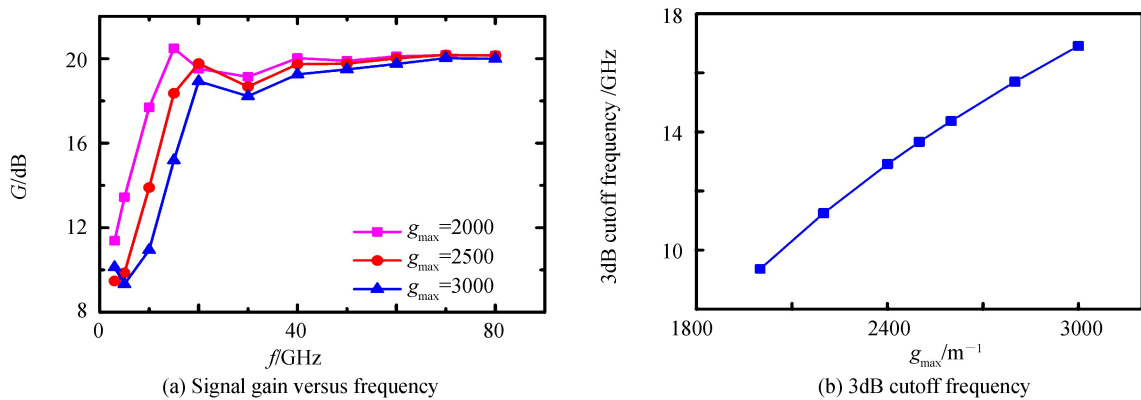


图 6 最大模式增益对增益频响的影响

Fig.6 Impacts of maximum modal gain on gain frequency response

2.4 注入电流的影响

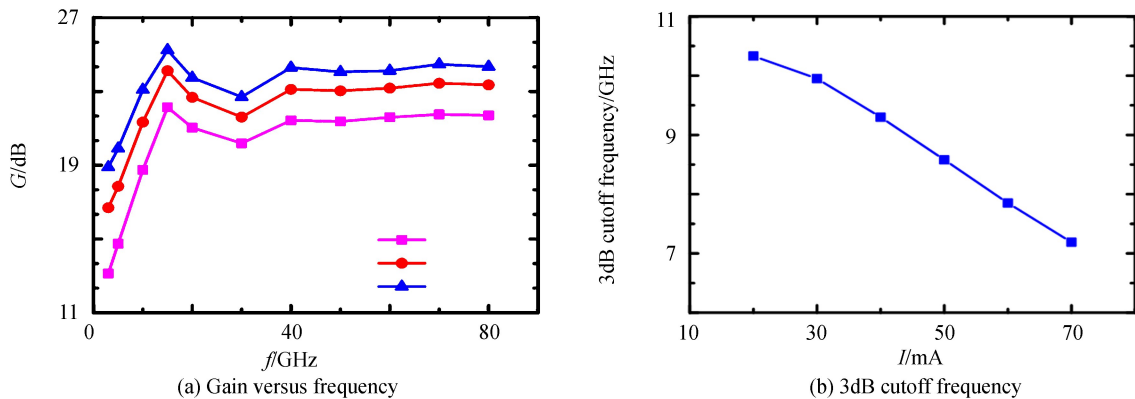


图 7 注入电流对增益频响的影响

Fig.7 Impacts of injection current on gain frequency response

图 7(a)为不同注入电流情况下的信号增益频响曲线(此时 $P_0=0.075$ mW),随着注入电流的增大,增益频响曲线向上移动,最大信号增益增大.这是因为注入电流越大,基态载流子占有几率增加,同时会提高 R-QDSOA 的增益.图 7(b)为电流随 3 dB 截止频率的关系曲线,注入电流的增大可提高有源区载流子密度,提高信号增益,有源区的增益饱和程度减小,使得高通效应降低,导致 3 dB 截止频率减小.

2.5 有源区长度的影响

在相同注入电流 J 的情况下,测试不同有源区长度对信号增益的影响.由图 8(a)可知,随着有源区长度的增加,低频区域(0~15 GHz)获得的增益明显降低,高频区域获得的增益变化很小.这是由于有源区长度的增加,在高频区域载流子较为充足,输入光将在增益介质获得更多的增益,因此增益会有一些的提高;而在低频区域载流子被大量消耗,增加有源区长度相当于降低注入电流密度,使得载流子浓度进一步降低,因此增益会急剧降低.由图 8(b)可知有源区长度增加将使得有源区内平均光功率增大,这将消耗更多的载流子,导致增益饱和程度更深,高通效应更加明显,从而导致 3 dB 截止频率增大.另一方面有源区的电流密度会随着有源区的长度增加而减小,相对来说注入电流就降低了,由图 7(b)可知降低注入电流,3 dB 截止频率增加.

图 8(a)中的小图为调制频率处于 10~40 GHz 的局部放大图(对应图中虚线框的范围),从小图中可以看出 L 为 1.5 mm、2 mm 和 3 mm 分别对应最低凹陷点频率大约为 32 GHz、25 GHz 和 21 GHz,即随着有源区长度的增加,最低凹陷点频率在减小.从图 4 至图 7 可以知道,有源区长度不变,最低凹陷点频率也不改变.这是由于前向传播的信号和反射回来的信号将会相互叠加,当调制频率刚好等于信号从 R-QDSOA 前端传播到后端面所需时间倒数的二分之一时(即 $f=v_g/2L$),前向传播的信号和后向传播的信号(后端面反射回来的信号)相位反向,这样总的电场强度达到最小,因此获得的增益将会降到最低,就会出现图 8(a)中的凹陷点现象.

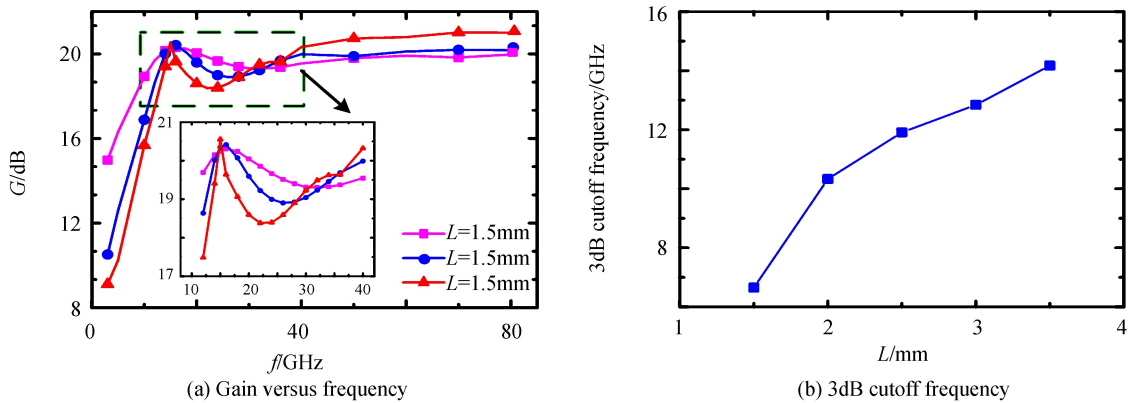


图 8 有源区长度对增益频响的影响

Fig.8 Impacts of length of active region on frequency characteristics

2.6 载流子跃迁时间的影响

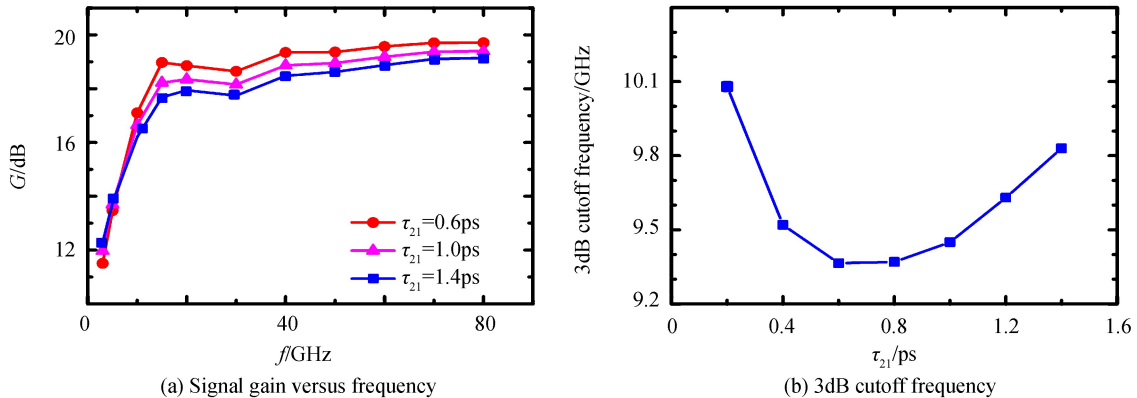


图 9 载流子从 ES 到 GS 的跃迁时间 τ_{21} 对增益频响的影响

Fig.9 Influences of electron relaxation time from ES to GS τ_{21} on gain frequency response

在 QDSOA 中, GS 的电子占据几率直接影响光信号的增益. 电子从 ES 到 GS 的跃迁速率决定了 ES 中的电子能否快速补充 GS 中消耗的电子, 从而影响有源区的增益饱和程度. 因此, 选取电子从 ES 到 GS 的跃迁时间 τ_{21} 进行分析. 如图 9(a) 和 (b) 所示, 随着 τ_{21} 的增大, 从 ES 到 GS 的跃迁速率下降, GS 的电子无法得到及时的补充, 最大信号增益下降. 但由于已经处于增益饱和状态, 故增益下降幅度较小. 同时, 随着 τ_{21} 的增大, 3dB 截止频率变化不大, τ_{21} 在 0.2~1.4 ps 变化范围内, 3 dB 截止频率只有约 0.7GHz 的变化.

4 结论

本文通过建立 R-QDSOA 仿真模型, 对 R-QDSOA 在增益饱和情况下的高通特性进行了研究, 分析了输入光功率、最大模式增益、有源区长度、注入电流和载流子跃迁时间对 3 dB 截止频率的影响; 比较了 R-QDSOA 和 TW-QDSOA 对频率响应的影响. 研究表明, R-QDSOA 既能对低频信号具有抑制作用, 又能为高频信号提供较大的增益, 这验证了 R-QDSOA 用于无色 WDM-PON 的可行性. 同时, R-QDSOA 的 3 dB 截止频率可高达 10 GHz 以上, 能够实现高速的上行信号传输. 因此 R-QDSOA 在无色 WDM-PON 方面具有巨大的应用前景, 同时也为后续 R-QDSOA 的研究提供了理论基础.

参考文献

- [1] PANDEY G, GOEL A. Performance analysis of symmetrical 10 Gbps colorless WDM-PON using subcarrier modulated downstream and wavelength converted upstream through RSOA[J]. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 2014, **125**(17): 4951-4954.
- [2] ZENG Duo-duo, LIU Jie. Demonstration of a data remodulation scheme with downstream ASK-DPSK signals and upstream OOK signal using RSOA for WDM-PONs[C]. Communications and Photonics Conference and Exhibition, 2011, **7988**(2): 523-524.
- [3] CHO K Y, HONG U H, CHOI H, et al. Maximum operable speed of WDM PON employing bandwidth-limited RSOAs [J]. *Optics Communications*, 2014, **312**(4): 159-162.
- [4] SU Ting, ZHANG Min, LIU Ming-tao, et al. Improved 10-Gbps uplink transmission in WDM-PON with RSOA-based colorless ONUs and MZI-based equalizers[J]. *Optics and Laser Technology*, 2012, **51**(10): 90-97.
- [5] AGATA A, HOURIUCHI Y. RSOA-Based 10G WDM PON Using FEC and MLSE Equalizers[C]. Optical Fiber Communication, 2010, **206**(1): 1-3.
- [6] SANO T, AGATA A, NISHIMURA K. 10.5Gbit/s 8-PSK signal generated by directly modulating RSOA with instantaneous injection/depletion currents[C]. Optical Fiber Communication Conference and Exposition and the National Fiber Optic Engineers Conference. Anaheim; CA, 2013: 1-3.
- [7] TALEB H, ABEDI K. Ultrafast all-optical signal processing using optically pumped QDSOA-based Mach-Zehnder interferometers[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2013, **19**(5): 1-8.
- [8] GUAN Lei, WANG Zhuo-ran, YUAN Guo-hui, et al. Characteristics of all-optical wavelength conversion based on quantum-dot semiconductor optical amplifier[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, **45**(11): 1113002.
管磊, 王卓然, 袁国慧, 等. 基于量子点半导体光放大器全波长变换特性[J]. *光子学报*, 2016, **45**(11): 1113002.
- [9] SCHMIDT-LANGHORST C, MEUER C, GALPERIN A, et al. 80 Gb/s multi-wavelength booster amplification in an InGaAs/GaAs quantum-dot semiconductor optical amplifier[C]. 36th European Conference and Exhibition on Optical Communication, Torino, 2010: 1-3.
- [10] HAMIE A, HAMZE M, WEI J L, et al. Theoretical investigations of quantum-dot semiconductor optical amplifier enabled intensity modulation of adaptively modulated optical OFDM signals in IMDD PON systems[J]. *Optics Express*, 2011, **19**(25): 25696.
- [11] SHEN Su-qi, LING Yun, LIAO Li-dan, et al. High pass filter characteristics of saturated quantum dot Semiconductor optical amplifiers[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, **34**(10): 1025001.
申魁祺, 凌云, 廖丽丹等. 饱和量子点半导体光放大器高通滤波特性[J]. *光学学报*, 2014, **34**(10): 1025001.
- [12] KOTB A. NOR gate based on QD-SOA at 250 Gbit/s[J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2013, **45**(6): 473-480.
- [13] GAYEN D K, CHATTOPADHYAY T. Simultaneous all-optical basic arithmetic operations using QD-SOA-assisted Mach-Zehnder interferometer[J]. *Journal of Computational Electronics*, 2016, **15**(3): 1-11.
- [14] DIMITRIADOU E, ZOIROS K E. On the design of ultrafast all-optical NOT gate using quantum-dot semiconductor optical amplifier-based Mach - Zehnder interferometer[J]. *Optics and Laser Technology*, 2012, **44**(3): 600-607.
- [15] IZADTAR S M, RAZAGHI M, HASSANZADEH A. Quantum dot semiconductor optical amplifier: role of second excited state on ultrahigh bit-rate signal processing.[J]. *Applied Optics*, 2017, **56**(12): 3599-3607.