

饱和量子点半导体光放大器高通滤波特性

申甦祺¹ 凌 云¹ 廖丽丹¹ 贺彬彬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, 四川 成都 610054)
² 西南石油大学电气信息学院, 四川 成都 637001)

摘要 量子点半导体光放大器(QDSOA)具有更小的载流子恢复时间和更高的放大带宽,是光信息处理的理想器件。利用 QDSOA 三能级电子跃迁速率方程和光场传输方程,建立了有源区分段模型,对饱和 QDSOA 的频率响应特性进行研究,得到输入光功率、注入电流、有源区长度、最大模式增益和载流子跃迁时间等参数与 3 dB 截止频率和抑制比之间的关系。结果表明,饱和 QDSOA 具有高通滤波特性,有较宽的高频信号放大带宽和较高的 3 dB 截止频率,通过优化参数,可以获得比传统体材料和量子阱材料半导体光放大器更加优异的特性,为 QDSOA 的设计与应用提供了理论指导。

关键词 光电子学;量子点半导体光放大器;速率方程;频率响应;高通滤波

中图分类号 TN365 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS201434.1025001

High Pass Filter Characteristics of Saturated Quantum Dot Semiconductor Optical Amplifiers

Shen Suqi¹ Ling Yun¹ Liao Lidan¹ He Binbin¹ 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, Sichuan 610054, China

² School of Electrical Engineering and Information, Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan 637001, China

Abstract Quantum dot semiconductor optical amplifiers (QDSOAs) are ideal devices for optical signal processing due to their shorter carrier recovery time and larger amplification bandwidth. With the three-level electron transition rate equations and the traveling-wave equations in QDSOAs, a segmented numerical model of the active region is established. Based on this model, the frequency response characteristics of saturated QDSOAs are obtained and the impacts of input optical power, injection current, active region length, maximum modal gain and carrier transition time on the 3 dB cutoff frequency and suppression ratio are investigated. The results show that the saturated QDSOA has a high pass filter characteristic with large bandwidth and a high 3 dB cutoff frequency. By optimizing the QDSOAs' parameters, the more excellent properties can be obtained than the traditional buck or quantum well semiconductor optical amplifiers. These features will provide useful theoretical instructions on the designs and applications of QDSOAs at the saturated states.

Key words optoelectronics; quantum dot semiconductor optical amplifier; rate equations; frequency response; high pass filter

OCIS codes 250.5590; 250.5980; 060.2630

1 引 言

半导体光放大器(SOA)是光通信的关键器件,由于其功耗低、体积小、增益高等优点,得到了广泛

的应用^[1-2]。在波分复用无源光网络(WDM-PON)中,光网络单元(ONU)在接收下行光信号的同时,利用反射型半导体光放大器(RSOA)作为光调制器

收稿日期: 2014-06-06; **收到修改稿日期:** 2014-07-02

基金项目: 国家 863 计划(2012AA011304)、国家自然科学基金青年科学基金(61101095)、西南石油大学青年基金(2012XJZ022)

作者简介: 申甦祺(1989—),男,硕士研究生,主要从事光信息处理方面的研究。E-mail: shensq2014@163.com

导师简介: 凌 云(1979—),男,博士,副教授,主要从事光纤通信方面的研究。E-mail: yling@uestc.edu.cn

对下行光信号进行再调制,避免了为每个 ONU 配置不同波长光源的要求,实现了无色的 ONU^[3-4]。其中,RSOA 在饱和状态下的高通滤波特性擦除下行信号是实现再调制的前提。为了减小残留下行信号对上行调制信号的干扰,下行信号带宽要求小于 RSOA 高通滤波截止频率。传统的体材料 SOA 和量子阱材料 SOA 的高通滤波 3 dB 截止频率过低,通常在 1~2 GHz 左右,成为限制下行信号带宽和提高系统速率的瓶颈之一。量子点半导体光放大器(QDSOA)在有源区引入三维受限的量子点结构,具有增益恢复时间短、饱和增益高、阈值电流低等优点^[5-6],其饱和高通滤波特性的研究对于采用 QDSOA 替代 SOA 作为光调制器具有重要意义。

本文从 QDSOA 三能级跃迁速率方程出发,结合光场传输方程建立有源区分段模型,对影响饱和 QDSOA 高通滤波特性的因素进行研究。

2 仿真模型

QDSOA 的仿真模型将有源区结构简化为浸润层(WL)和量子点(QD)两部分,并将量子点内部的能态简化为基态(GS)和激发态(ES),如图 1 所示。电子注入 QDSOA 有源区后,首先进入浸润层,浸润层中的电子以跃迁时间 τ_{w2} 向激发态跃迁并以自发辐射时间 τ_{wR} 产生自发辐射;激发态的电子分别以跃迁时间 τ_{21} 和 τ_{2w} 向基态和浸润层跃迁,基态的电子以跃迁时间 τ_{12} 向激发态跃迁并以自发辐射时间 τ_{1R} 产生自发辐射,同时与输入光信号相互作用产生受激辐射,对光信号进行放大。

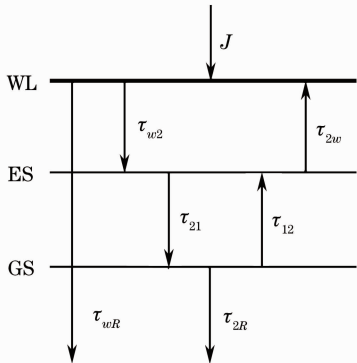


图 1 QDSOA 能级和电子跃迁示意图

Fig. 1 Energy levels and electron transitions in QDSOA

在 QDSOA 中,电子在浸润层、激发态和基态的跃迁速率方程如下^[7-8]:

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

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

$$\frac{\partial f_e}{\partial t} = \frac{h_e(1-f_e)}{\tau_{21}} - \frac{f_e(1-h_e)}{\tau_{12}} - \frac{f_e^2}{\tau_{1R}} - \frac{L_w g P}{N_Q \sigma h \nu}, \quad (3)$$

式中 N_w 为浸润层中的电子密度, h_e 为电子在激发态中的占据几率, f_e 为电子在基态中的占据几率, P 为光功率, L 为 QDSOA 有源层长度, L_w 为有源层厚度, W 为有源层宽度, J 为注入电流密度, $J = I/(L \times W)$, 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, $h\nu$ 为光子能量, g 为模式增益, $g = g_{\max}(2f_e - 1)$, g_{\max} 为最大模式增益, 其中包含了光场限制因子的影响。速率方程主要考虑在小电流注入的情况下,浸润层可以接纳从激发态逃逸的所有载流子,并且忽略了载流子在激发态的自发辐射复合。

QDSOA 中的光场描述为

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

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

式中 $E_s^+(z)$ 为沿 z 正向传播的光的电场强度, $E_s^-(z)$ 为沿 z 反向传播的光的电场强度, α 为损耗系数, α_H 为线宽增强因子, $j = (-1)^{1/2}$ 。

仿真采用的有源区分段模型如图 2 所示^[9],将长度为 L 的 QDSOA 平均分为 M 段,每段长度为 $\Delta z = L/M$,在 M 足够大时,可以近似认为各段中的光场和载流子占据几率相同,光在各段的传输时间为 $\Delta t = n_{\text{eff}} \Delta z / c$,其中 n_{eff} 为平均折射率, c 为光速。利用 Δz 对空间进行离散, Δt 对时间进行采样,用数值方法求解(1)~(5)式,可以计算出各段中各个时刻的光场和载流子占据几率,并得到相应的输出光功率。图 2 中 E_{in} 和 E_{out} 为输入和输出电场强度, R_1 和 R_2 为端面反射率, N 为各段中的电子密度。

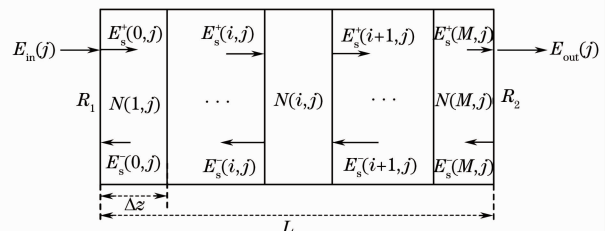


图 2 QDSOA 分段模型

Fig. 2 Segmented model of QDSOA

3 测试方法、指标和仿真参数

3.1 测试方法

为了研究饱和 QDSOA 的高通滤波特性,采用叠加有一定直流光功率的正弦调制信号光作为输入,则输入信号可以表示为

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

式中 P_0 为输入平均光功率, m 为输入信号调制系数, f 为正弦调制频率。直流光功率用于使被测 QDSOA 处于饱和状态。不同频率的光信号在 QDSOA 中的放大情况不同,假设 QDSOA 端面反射率是理想的,即 $R_1=R_2=0$,在不考虑噪声和高次谐波的情况下,输出信号平均光功率和调制系数均

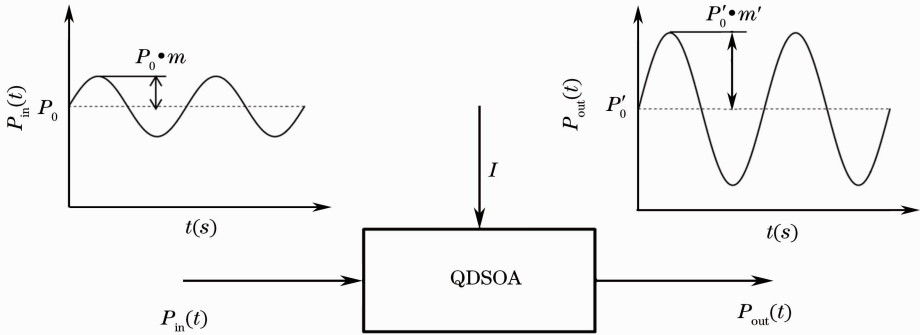


图 3 QDSOA 的测试方法

Fig. 3 Test method for QDSOA

3.2 测试指标

3.2.1 3 dB 截止频率

为了能够定量描述各个参数对饱和 QDSOA 高通滤波特性的影响,定义 QDSOA 的 3 dB 截止频率为信号增益随调制频率减小时, G_{AC} 相比最大值降低 3 dB 所对应的频率。

3.2.2 抑制比的定义

为了描述饱和 QDSOA 对高频信号和低频信号的增益差别,定义抑制比为

$$R = 10\lg[G_{AC}(f_H)/G_{AC}(f_L)], \quad (9)$$

式中 $G_{AC}(f_H)$ 为高频信号增益, $G_{AC}(f_L)$ 为低频信号增益,则 R 可以表示 QDSOA 对低频信号抑制能力的大小。采用高频信号的频率 $f_H=80$ GHz 和低频信号的频率 $f_L=100$ MHz,可以得到抑制比与 QDSOA 不同参数的关系。

3.3 仿真参数

仿真模型采用的主要参数如表 1 所示^[7-8]。

4 仿真结果与讨论

4.1 输入光功率的影响

在 P_0 分别为 0.015, 0.035, 0.055, 0.075 mW

为光信号调制频率的函数,分别表示为 $P'_0(f)$ 和 $m'(f)$,则相应的输出功率可以表示为

$$P_{out}(t) = P'_0(f)[1 + m'(f)\sin(2\pi ft)]. \quad (7)$$

为了研究 QDSOA 对高频正弦信号的影响,比较了输入和输出正弦信号幅度的变化,输入和输出信号的幅度分别可以表示为 $P_0 \cdot m$ 和 $P'_0(f) \cdot m'(f)$,如图 3 所示,定义增益频率响应为

$$G_{AC}(f) = 10\lg\left[\frac{P'_0(f) \cdot m'(f)}{P_0 \cdot m}\right]. \quad (8)$$

利用数值仿真的结果,可以通过(8)式计算得到 G_{AC} 与频率 f 的关系。

时,得到不同输入光功率下信号增益与调制频率的关系如图 4 所示。

表 1 QDSOA 仿真模型参数

Table 1 Simulation model parameters of QDSOA

Parameter	Specification
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_{ew} /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}
Average optical power P_0/mW	0.015
Length of active layer L/mm	4
Effective thickness of active layer $L_w/\mu m$	0.25
Width of active layer $W/\mu m$	3
Injection current I/mA	20
Maximum modal gain g_{max}/m^{-1}	2100
Linewidth enhancement factor α_H	0.1
Wavelength λ/nm	1550
Waveguide loss α/m	200
Modulation factor m	0.667

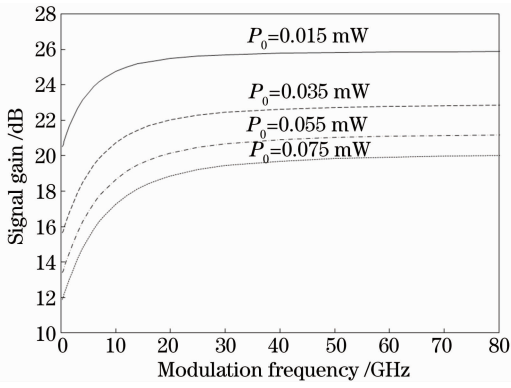


图 4 信号增益与调制频率的关系

Fig. 4 Relationship between signal gain and modulation frequency

由图 4 可知,饱和 QDSOA 具有高通滤波特性,信号增益随着调制频率的增加而增大。在 10 GHz

调制频率以下,信号增益随着频率的增加迅速上升;10~20 GHz 范围内,信号增益随调制频率增速逐渐减缓;调制频率超过 20 GHz 后,信号增益缓慢增加并趋于稳定,可以看出饱和 QDSOA 具有较宽的高频信号放大带宽,且 3 dB 截止频率较高,约在 3~10 GHz 范围。对比在不同输入光功率下的特性曲线,可以看出增大输入光功率将使信号增益降低,这是由于输入大的直流光功率会使 QDSOA 中各能级平均载流子浓度下降,产生较大的增益饱和效应,降低了输出信号的增益,使增益曲线整体下降,并且随着光功率相同幅度的增加,下降的幅度逐渐减小。

4.2 注入电流的影响

将 QDSOA 注入电流 I 从 20 mA 逐渐增大至 70 mA,可以得到 3 dB 截止频率和抑制比与注入电流的关系如图 5 所示。

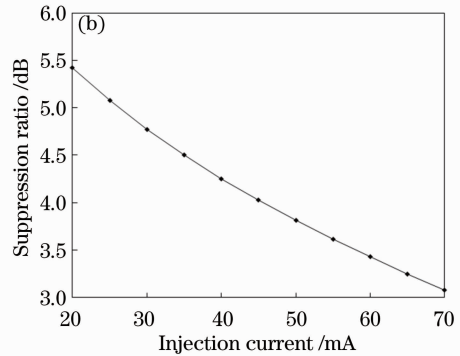
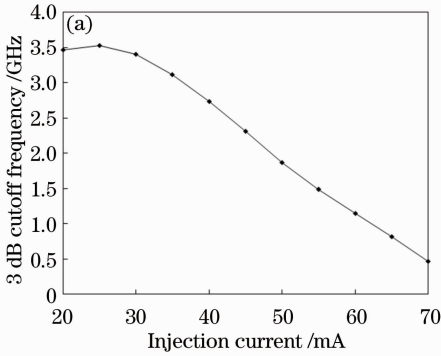


图 5 注入电流对频率特性的影响。(a) 3 dB 截止频率;(b)抑制比

Fig. 5 Influences of injection current on frequency characteristics. (a) 3 dB cutoff frequency; (b) suppression ratio

从图 5 中可以看出,当电流从 20 mA 刚开始增加时,由于高频信号增益增幅略大于原先 3 dB 截止频率处的增幅,使得 3 dB 截止频率略有上升;之后随着电流进一步增加,QDSOA 饱和程度降低,低频部分增益增幅整体超过高频部分,从而使得 3 dB 截止频率不断下降。而从注入电流对抑制比的影响可

以看出,采用较小的注入电流有利于得到较高的信号抑制比。

4.3 有源区长度的影响

为了得到有源区长度对饱和 QDSOA 高通特性的影响,选择有源区长度在 3.5~6 mm 范围内变化,得到的结果如图 6 所示。

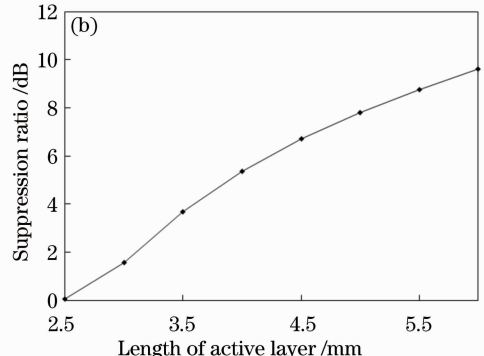
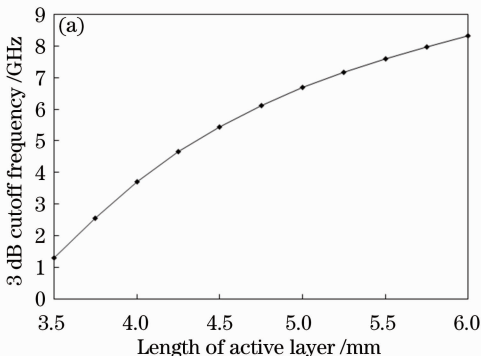
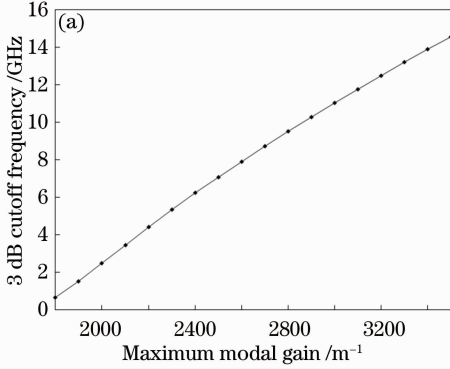


图 6 有源区长度对频率特性的影响。(a) 3 dB 截止频率;(b)抑制比

Fig. 6 Influences of active region length on frequency characteristics. (a) 3 dB cutoff frequency; (b) suppression ratio

从图 6 可以看出, QDSOA 的 3 dB 截止频率随着有源区长度的增加而增大, 这是因为增加有源区长度将使电流密度降低, 相当于减小了输入电流, 从而增大了单位长度上高低频信号的增益差。同时, 随着 QDSOA 有源区长度的增加, 高频信号与低频信号的增益差沿着光场传播方向逐渐被放大, 使对高频的放大效果以及对低频的抑制效果更为明显。



随着有源区长度的增加, 曲线逐渐平缓, 说明长度对 QDSOA 高通滤波特性的提升效果逐渐减小。

4.4 最大模式增益的影响

为了得到最大模式增益对饱和 QDSOA 高通特性的影响, 选择 g_{\max} 在 $1800 \sim 3500 \text{ m}^{-1}$ 范围内变化, 得到的结果如图 7 所示。

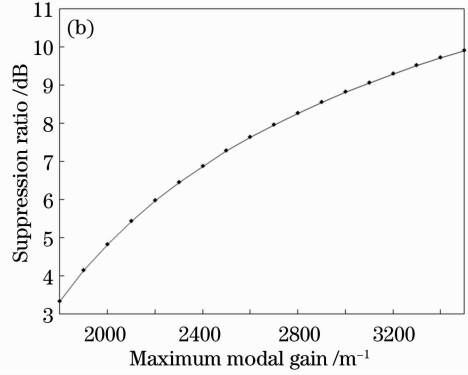


图 7 最大模式增益对频率特性的影响。(a) 3 dB 截止频率; (b) 抑制比

Fig. 7 Influences of maximum modal gain on frequency characteristics. (a) 3 dB cutoff frequency; (b) suppression ratio

从图 7 中可以看出, QDSOA 的 3 dB 截止频率和抑制比随着最大模式增益的增加而增大, 这与光在有源区的传输过程有关。由于有源区增益 $g = g_{\max}(2f_e - 1)$, 而高频信号与低频信号间的增益差值主要是由基态载流子占据几率 f_e 的差值决定的, g_{\max} 增大使得高低频信号增益差随之增大。因此, 可以通过改变有源区材料增加最大模式增益, 进一步提高饱和 QDSOA 的高通抑制比。

4.5 载流子跃迁时间的影响

从之前的各个参数对饱和 QDSOA 高通特性的影响可以看出, 饱和 QDSOA 高通特性与基态的载流子占据情况有很大关系, 因此研究与基态载流子占据情况有关的载流子跃迁时间对 QDSOA 的 3 dB

截止频率和抑制比的影响是有必要的。选择从激发态到基态的跃迁时间 τ_{21} , 从基态到激发态的跃迁时间 τ_{12} 以及基态的自发辐射时间 τ_{1R} 对饱和 QDSOA 高通特性的影响进行研究, 得到的结果如图 8~10 所示。

从图 8 中可以看出, τ_{21} 的增大将使得基态载流子浓度下降, QDSOA 的 3 dB 截止频率和抑制比下降。而从图 9 和图 10 可以看出, τ_{12} 和 τ_{1R} 的增大将导致基态载流子浓度升高, QDSOA 的 3 dB 截止频率和抑制比也随之上升。因此, 要提高饱和 QDSOA 的抑制比, 可以通过减小 τ_{21} 并且增大 τ_{12} 和 τ_{1R} 实现。

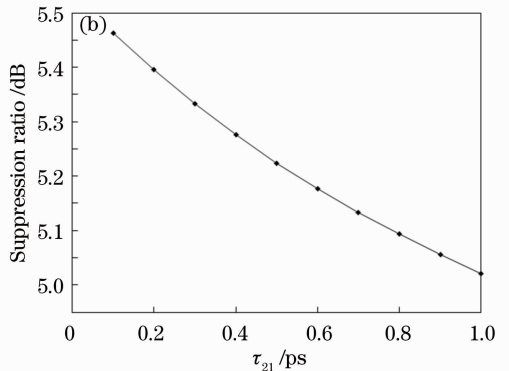
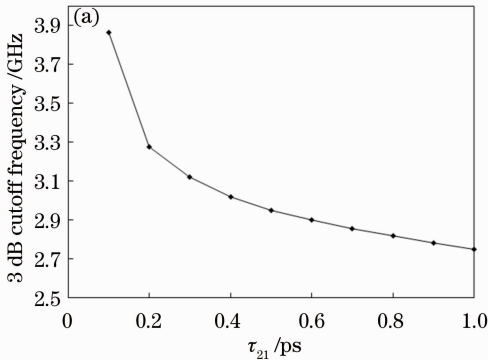


图 8 激发态到基态的跃迁时间对频率特性的影响。(a) 3 dB 截止频率; (b) 抑制比

Fig. 8 Influences of electron relaxation time from ES to GS on frequency characteristics. (a) 3 dB cutoff frequency; (b) suppression ratio

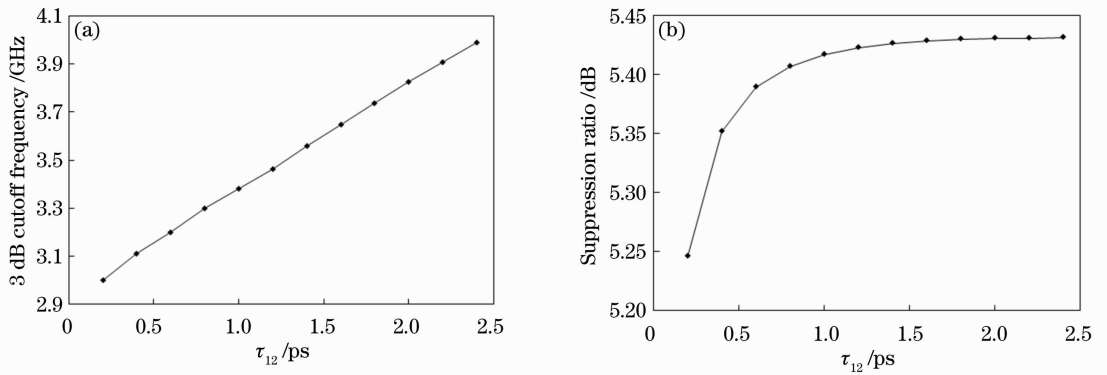


图 9 基态到激发态的跃迁时间对频率特性的影响。(a) 3 dB 截止频率；(b)抑制比

Fig. 9 Influences of electron escape time from GS to ES on frequency characteristics. (a) 3 dB cutoff frequency; (b) suppression ratio

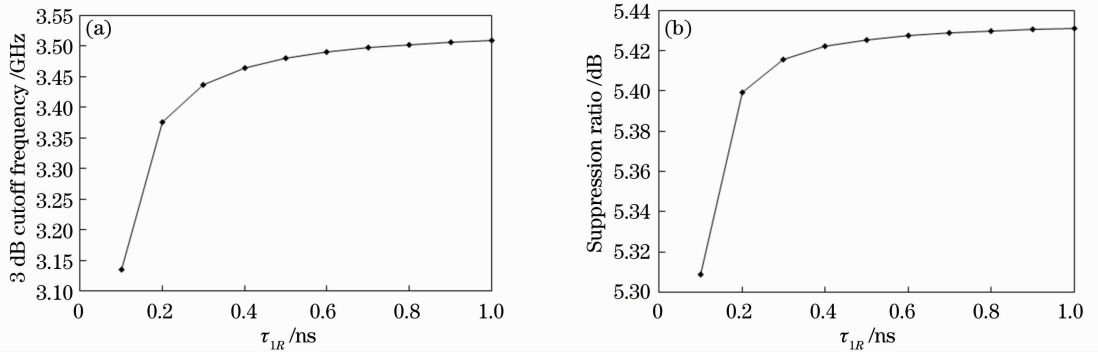


图 10 基态的自发辐射时间对频率特性的影响。(a) 3 dB 截止频率；(b)抑制比

Fig. 10 Influences of spontaneous radiative lifetime in GS. (a) 3 dB cutoff frequency; (b) suppression ratio

5 结 论

通过对 QDSOA 三能级速率方程和光场传播方程进行数值仿真,得出饱和 QDSOA 各参数对高通滤波特性的影响。研究表明,QDSOA 相比于体材料和量子阱材料 SOA 具有更高的截止频率和更大的高频信号放大带宽。利用仿真结果可以得到 QDSOA 参数优化的方法,即在一定范围内,通过减小注入电流,增大有源区长度和最大模式增益,以及减小 τ_{21} 并增大 τ_{12} 和 τ_{1R} ,可以提高饱和 QDSOA 高通滤波特性的 3 dB 截止频率和抑制比,从而改善饱和 QDSOA 在信号处理方面的性能。

参 考 文 献

- 1 C Porzi, G Serafino, A Bogoni, *et al.*. Phase-preserving amplitude noise compression of 40 Gb/s DPSK signals in a single SOA [J]. *J Lightwave Technol*, 2014, 32(10): 1966–1972.
- 2 Y Ling, K Qiu, W Zhang, *et al.*. Optical power equalization using Fabry-Perot semiconductor optical amplifier [J]. *Chin Opt Lett*, 2006, 4(12): 690–693.

- 3 E Wong, K L Lee, T B Anderson. Directly modulated self-seeding reflective semiconductor optical amplifiers as colorless transmitters in wavelength division multiplexed passive optical networks [J]. *J Lightwave Technol*, 2007, 25(1): 67–74.
- 4 M L Deng, Y Ling, X F Chen, *et al.*. Self-seeding-based 10 Gb/s over 25 km optical OFDM transmissions utilizing face-to-face dual-RSOAs at gain saturation [J]. *Opt Express*, 2014, 22(10): 11954–11965.
- 5 S Wilkinson, B Lingnau, J Korn, *et al.*. Influence of noise on the signal quality of quantum-dot semiconductor optical amplifiers [J]. *Sel Top Quantum Electron*, 2013, 19(4): 1900106.
- 6 Li Ruigang, Liu Yumin, Yu Zhongyuan, *et al.*. Rate equations and gain characteristics of quantum-dot semiconductor optical amplifiers [J]. *Chinese J Lasers*, 2009, 36(6): 1366–1370. 李瑞刚, 刘玉敏, 俞重远, 等. 量子点半导体光放大器的速率方程和增益特性[J]. *中国激光*, 2009, 36(6): 1366–1370.
- 7 L Xiaoxu, L Guifang. Comments on "theoretical analysis of gain-recovery time and chirp in QD-SOA" [J]. *Photon Technol Lett*, 2006, 18(22): 2434–2435.
- 8 Y Ben-Ezra, M Haridim, B I Lembrikov. Theoretical analysis of gain-recovery time and chirp in QD-SOA [J]. *Photon Technol Lett*, 2005, 17(9): 1803–1805.
- 9 Yun Ling, Kun Qiu, Ying Pang, *et al.*. Time-to-live decrementing scheme in optical packet switching [J]. *Journal of Optical Networking*, 2006, 5(12): 957–966.

栏目编辑: 史 敏