

利用较完善模型研究半导体光放大器 对皮秒光脉冲的放大*

夏光琼¹ 吴正茂¹ 林恭如²

¹(西南师范大学物理系, 重庆 400715)

²(台湾交通大学光电工程研究所, 新竹 300)

(2003 年 4 月 4 日收到, 2003 年 4 月 29 日收到修改稿)

提出了一个描述半导体光放大器(SLA)对皮秒脉冲的放大这一物理过程的较为完善的物理模型,并数值分析了光脉冲经SLA放大后的上升时间和下降时间.结果表明,随着SLA偏置电流的增大,上升时间将缩短而下降时间将延长.输入脉冲的大峰值功率将加速上升时间的缩短和下降时间的延长.增益压缩对脉宽为几个皮秒的输入脉冲的上升时间和下降时间有明显的影响,而对脉宽为几十皮秒的输入脉冲可近似认为没有影响.增益非对称和漂移强烈影响上升和下降时间.

关键词:半导体光放大器,皮秒光脉冲,上升和下降时间

PACC:4280W,4225B

1. 引言

随着半导体技术的发展,半导体光放大器(SLA)的性能已得到极大改善.SLA已被广泛地应用到光纤通信系统的众多领域,由于其在高速光开关、全光波长转换、2R或3R再生以及在线放大等诸多方面均具有广阔的应用前景,因而备受人们关注^[1-8].近年来,SLA对超短光脉冲的动态响应已进行了广泛的理论和实验研究^[9-14].随着人们对超短光脉冲经SLA放大这一复杂物理过程认识的逐步提高,用于描述这个动态过程的物理模型也逐步得到改善.最初的理论模型是由Agrawal和Olsson提出的,该模型包含了由于受激辐射消耗载流子引起的SLA增益饱和^[9],以后的模型逐步发展到包含带内载流子受热和频谱烧孔引起的增益压缩^[10-12],增益非对称和漂移^[12,15,16],随位置和时间变化的载流子寿命^[15,16]等物理机理.然而,由于采用包含上面所有机理的模型在进行数值模拟时比较复杂,所以一般的模型都只包含部分的物理机理.本文提出了一个描述SLA对皮秒脉冲的放大这一物理过程的包含上面所有机理的理论模型,并着重讨论光脉冲经SLA放大后的上升时间(定义为放大后光脉冲前沿

的幅值从峰值的10%上升到90%所用的时间)和下降时间(定义为放大后光脉冲后沿的幅值从峰值的90%下降到10%所用的时间).毋庸置疑,光脉冲的上升和下降时间是脉冲的一个重要参数,尤其是在光脉冲串经过SLA的情形^[17].

2. 理论模型

假定SLA两端面的反射率为零,考虑到上面所提到的物理机理,描述光脉冲经SLA放大后的速率方程可写为

$$\frac{\partial \mathcal{N}(z, T)}{\partial T} = \frac{I}{eV} - F(N) - \frac{g_m(z, T)}{\hbar\omega\sigma} P(z, T) \quad (1)$$

$$\frac{\partial P(z, T)}{\partial z} = g_m(z, T) P(z, T), \quad (2)$$

以及

$$F(N) = AN + BN^2 + CN^3 = N/\tau_c, \quad (3)$$

其中 N 为载流子数密度, $\mathcal{T} = t - z/v_g$, v_g 为SLA中的群速度)是在随脉冲运动的参照系中所测得的时间, I 为SLA的偏置电流, e 为电子电荷, V 为SLA有源层的体积, $\hbar\omega$ 为光子能量, σ 为有源层横截面积, P 是光功率, A , B 和 C 分别表征非辐射复合、辐射复合和俄歇过程, τ_c 为随位置和时间变化的载流

*教育部科学技术重点项目(批准号 03140)和重庆市应用基础研究项目资助的课题.

子寿命,在数值模拟过程中为了简化常被认为是常数^[11-13], g_m 为 SLA 的增益,可表示为^[12-14]

$$g_m(z, T) = \frac{\Gamma g(N)}{1 + \epsilon P(z, T)}, \quad (4)$$

式中 Γ 为限制因子, ϵ 为描述带内载流子受热和频谱烧孔效应的增益压缩因子, 并且

$$g(N) = a(N - N_0) - a_1(\lambda - \lambda_N)^2 + a_2(\lambda - \lambda_N), \quad (5)$$

式中 a 为微分增益系数, a_1 和 a_2 为表征增益带宽和增益分布非对称性的经验常数, N_0 为透明载流子数密度, λ 为输入脉冲的波长, λ_N 为跟载流子密度有关的增益峰值波长, 写成

$$\lambda_N = \lambda_0 - a_3(N - N_0), \quad (6)$$

式中 λ_0 为 SLA 透明时增益峰值波长, a_3 为表征增益峰值波长随腔内载流子数密度发生漂移的经验常数.

根据方程(1)–(6),可以对给定的输入脉冲经过 SLA 放大后出射脉冲的时域分布进行数值模拟,进而可以对放大后光脉冲的上升时间和下降时间进行研究.

3. 结果和讨论

为了简化,假定入射脉冲具有高斯型分布($P_{in} \exp[-(T/T_0)^2]$), P_{in} 为峰值功率, T_0 表征脉宽. 并且假定入射脉冲为单频光,这对皮秒的入射脉冲是合理的,因为此时入射脉冲的谱宽远小于 SLA 的增益带宽. 计算中所用的数据为 $L = 0.50 \times 10^{-3} \text{ m}$, $\sigma = 0.18 \times 10^{-12} \text{ m}^2$, $a = 2.5 \times 10^{-20} \text{ m}^2$, $a_1 = 7.4 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$, $a_2 = 3.155 \times 10^{25} \text{ m}^{-4}$, $a_3 = 3 \times 10^{-32} \text{ m}^4$, $\epsilon = 0.2 \text{ W}^{-1}$, $N_0 = 1.1 \times 10^{24} \text{ m}^{-3}$, $A = 1.5 \times 10^8$, $B = 2.5 \times 10^{-17} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, $C = 9.4 \times 10^{-41} \text{ m}^6 \text{ s}^{-1}$, $\lambda_0 = 1.55 \mu\text{m}$, 输入脉冲波长为 $1.55 \mu\text{m}$.

图 1 给出了 $P_{in} = 100 \text{ mW}$ 的输入脉冲在考虑了不同的物理机理后,经 SLA 放大后的上升和下降时间随偏置电流的变化曲线,图 1(a)(b)分别对应 $T_0 = 20 \text{ ps}$, 2 ps . 从图中可以看出,经 SLA 放大后脉冲的上升时间比输入脉冲的短,下降时间比输入脉冲长;随着偏置电流的增大,上升时间变短,下降时间变长. 这些现象归因于由于受激辐射消耗载流子引起的增益饱和效应. 实际上,如果仔细观察文献[9]中的图 2,也可以得到相同的结论. 用于表征载流子受热和频谱烧孔而引入的增益压缩将使上升时间增加

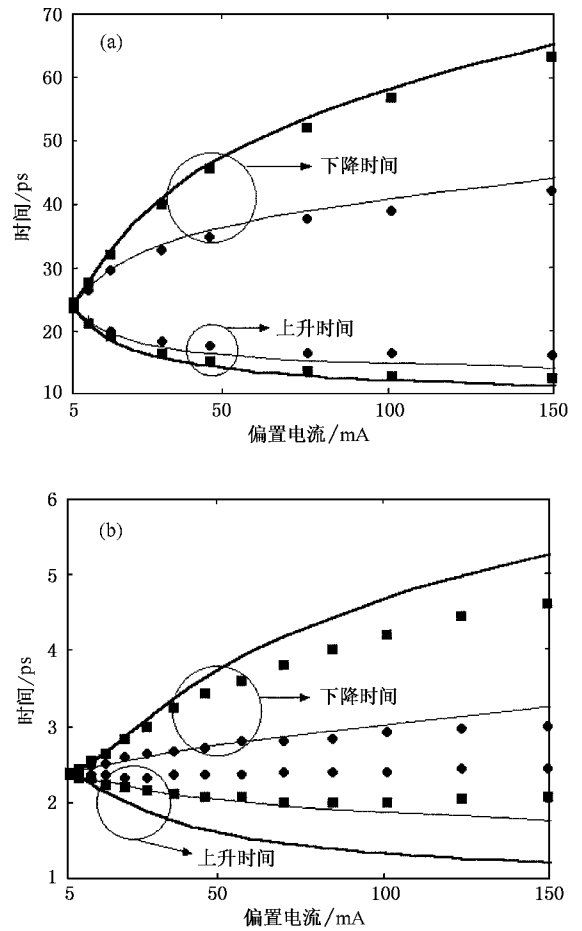


图 1 $P_{in} = 100 \text{ mW}$ 的输入脉冲在不同的物理机理下经 SLA 放大后的上升和下降时间随偏置电流的变化 (a) $T_0 = 20 \text{ ps}$ (b) $T_0 = 2 \text{ ps}$ (粗实线为忽略增益压缩,增益非对称和漂移,即 ϵ, a_1, a_2 和 a_3 都为零;方块为考虑增益压缩,忽略增益非对称和漂移,即 ϵ 有值, a_1, a_2 和 a_3 为零;细实线为忽略增益压缩,考虑增益非对称和漂移,即 ϵ 为零, a_1, a_2 和 a_3 有值;菱形为同时考虑增益压缩,增益非对称和漂移,即 ϵ, a_1, a_2 和 a_3 都不为零)

和下降时间缩短,是否考虑增益压缩效应对脉宽为几个皮秒的输入脉冲的影响很大,文献[10]中的图 2 给出了增益压缩对大幅值、脉宽为几个皮秒的输入脉冲的影响,仔细分析该图也可以得到相同的结论. 当输入脉冲的脉宽为几十皮秒时,由于带间过程具有相对较小的特征时间(频谱烧孔约为 $50\text{--}100 \text{ fs}$,载流子受热为 $700 \text{ fs}\text{--}1.3 \text{ ps}$),由此引入的增益压缩的影响也很小,仔细观察文献[11]中的图也可得到相似的结论. 从图 1 中还可以看出,SLA 的增益非对称和漂移对光脉冲的上升和下降时间有重要影响,这个影响的大小与输入光脉冲的波长和 SLA 的增益分布有关. 在本文中,入射光脉冲的波长和 SLA 处于透明时的增益峰值波长都假定为 $1.55 \mu\text{m}$.

当 SLA 偏置在透明电流以上,随着偏置电流的增大,增益的峰值波长将向短波长方向移动.输入光脉冲获得的增益将比不考虑增益非对称和漂移的情况下小,这必然削弱增益饱和效应,从而随着偏置电流的增大,脉冲的上升时间的缩短和下降时间的延长都将减缓.

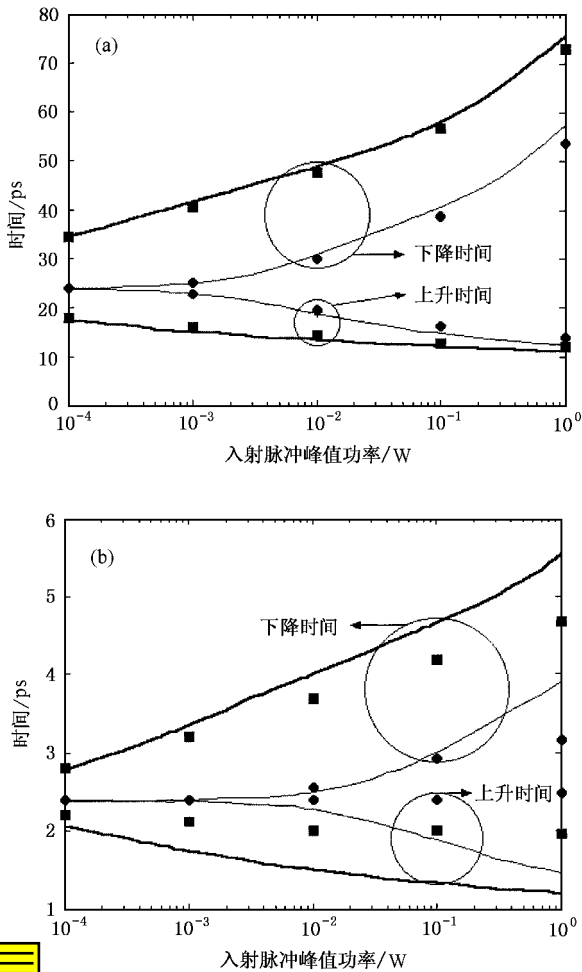


图2 SLA 的偏置电流 $I = 100\text{mA}$ 时,考虑不同物理机理下脉冲上升和下降时间跟输入脉冲峰值功率的关系 (a) $T_0 = 20\text{ps}$ (b) $T_0 = 2\text{ps}$

众所周知,输入脉冲的峰值功率将影响它在 SLA 中的放大过程.图 2 给出了 SLA 的偏置电流 $I = 100\text{mA}$ 时,考虑不同物理机理下脉冲上升和下降时间随输入脉冲峰值功率的变化关系,图 2(a)(b) 分别对应 $T_0 = 20\text{ps}$ 和 $T_0 = 2\text{ps}$.从图 2 可以看出,随着输入脉冲峰值功率的增大,光脉冲的上升时间将缩短,下降时间将延长.这是因为输入脉冲峰值功率的增大加速了增益饱和效应.同时,对脉宽为几个皮秒的输入脉冲(如图 2(b)所示),随着峰值功率的增

大增益压缩效应的影响将更大.比较忽略增益压缩、增益非对称和漂移的情形(图中粗实线所示)跟包含增益压缩,忽略增益非对称和漂移的情形(如图中方块所示),对 $P_{in} = 1\text{W}$ 的光脉冲上升时间有大约 0.8ps 的差异,这与文献[11]中图 2 得到的结果吻合.

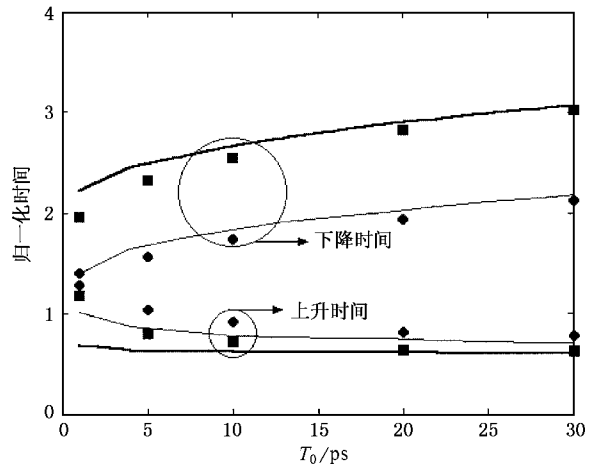


图3 $I = 100\text{mA}$, $P_{in} = 100\text{mW}$ 时不同物理机理下上升和下降时间(对 T_0 进行归一化)跟 T_0 的关系

根据以上结论和文献[10,11],可以预计,输入脉冲的脉宽显然也会影响脉冲的上升和下降时间.图 3 中给出了 $I = 100\text{mA}$, $P_{in} = 100\text{mW}$ 时考虑不同物理机理下上升和下降时间(对 T_0 进行归一化)跟 T_0 的关系.从图中可以看出,大的脉宽对脉冲上升时间缩短程度的加深很小,而对下降时间延长程度的加深很大.这是因为大的脉宽削弱了增益压缩效应,这跟文献[10,11]得到的结果一致.

4. 结 论

根据目前已观察到的一些物理机理,提出了一个用于研究半导体光放大器对皮秒光脉冲的放大过程的理论模型.数值研究了经 SLA 放大后的皮秒脉冲的上升和下降时间.结果表明,随着 SLA 偏置电流的增大,上升时间将缩短而下降时间将延长.输入脉冲的大峰值功率将加速上升时间的缩短和下降时间的延长.增益压缩对脉宽为几个皮秒的输入脉冲的上升时间和下降时间有明显的影 响,而对脉宽为几十皮秒的输入脉冲可近似认为没有影响.增益非对称和漂移强烈影响上升和下降时间.

- [1] Spiekman L *et al* 2000 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **12** 1082
- [2] Sun Y *et al* 1999 *Electron. Lett.* **35** 1863
- [3] Onishchukov G *et al* 1998 *Electron. Lett.* **34** 1597
- [4] Leuthold J *et al* 2001 *Opt. Quantum Electron.* **33** 939
- [5] Pleumeekers J *et al* 2002 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **14** 12
- [6] Stubkjaer K *et al* 1999 *IEICE Trans. Commun.* **E 82 - B** 390
- [7] Tsurusawa M, Nishimura K and Usami M 2002 *Jpn. J. Appl. Phys.* **41** 1199
- [8] Zhang X L *et al* 2000 *Acta Phys. Sin.* **49** 741 (in Chinese) [张新亮等 2000 物理学报 **49** 741]
- [9] Argrawal G P and Olsson N A 1989 *IEEE J. Quantum Electron.* **25** 2297
- [10] Tang J M, Spencer P S and Shore K A 1998 *J. Modern Opt.* **45** 1211
- [11] Mecozzi A and Mork J 1997 *J. Opt. Soc. Am. B* **14** 761
- [12] Gutierrez-Castrejon R *et al* 2000 *IEEE J. Quantum Electron.* **36** 1476
- [13] Liu H F *et al* 1993 *Appl. Phys. Lett.* **63** 132
- [14] Yu J and Jeppesen P 2001 *IEEE/OSA J. Lightwave Technol.* **19** 614
- [15] Willner A E and Shieh W 1995 *IEEE/OSA J. Lightwave Technol.* **13** 771
- [16] Jennen J, de Waardt H and Acket G 2001 *IEEE/OSA J. Lightwave Technol.* **19** 1116
- [17] Nakajima H *et al* 1993 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **5** 1032

Studies on the amplified picosecond optical pulse by semiconductor light amplifiers using an improved model^{*}

Xia Guang-Qiong¹ Wu Zheng-Mao¹ Lin Gong-Ru²

¹*Department of Physics, Southwest Normal University, Chongqing 400715, China*

²*Institute of Electro-Optical Engineering, Taiwan Chiao Tung University, Hsinchu 300, Taiwan, China*

(Received 4 April 2003 ; revised manuscript received 29 April 2003)

Abstract

After presenting an improved theoretical model that describes the dynamic process of optical pulses amplification by the semiconductor light amplifiers (SLAs), both the rising and falling time of amplified picosecond optical pulses by the SLAs have been investigated numerically. The results show that with the increase of the bias current of SLAs, the rising time will decrease and the falling time increase; the input pulse with a large peak power will accelerate the rising time shortening and the falling time lengthening; the gain compression has an obvious influence on the rising and falling time for several picosecond-width input pulses and gives approximately no effect on the input pulses in the tens of picosecond range; the gain asymmetry and shift strongly affect the rising and falling times.

Keywords : semiconductor light amplifiers, picosecond optical pulses, rising and falling time

PACC : 4280W, 4225B

^{*} Project supported by the Key Project of Chinese Ministry of Education (Grant No. 03140) and the Commission of the Science and Technology of Chongqing City, China.