

# SOA 动态增益特性的理论和实验研究\*

董建绩 张新亮 黄德修

(华中科技大学光电子工程系, 武汉 430074)

(2004 年 4 月 22 日收到, 2004 年 5 月 24 日收到修改稿)

提出了 SOA 有效增益恢复时间的概念, 同时推导了有效增益恢复时间的解析表达式. 针对 SOA 在交叉增益调制型波长转换方面的应用, 从理论上分析了注入电流、探测光功率、有源区长度对增益恢复时间的影响, 实验测量了不同条件下 SOA 的增益恢复时间, 实验结果与理论计算结果相符合.

关键词: 半导体光放大器, 增益恢复时间, 全光波长转换器

PACC: 4265P, 4255P, 4265K

## 1. 引言

利用半导体光放大器(SOA)中的非线性效应可以实现全光信号处理中的许多功能, 如全光波长转换<sup>[1-3]</sup>、全光 3R(重定时, 重放大, 重整形)再生、全光逻辑门、全光解复用、光脉冲压缩<sup>[4]</sup>、全光头信号提取、全光开关以及全光缓存等等, 因此 SOA 是全光信号处理中的关键基础性部件. 为了提高 SOA 在全光信号处理应用中的输出性能, 迫切需要改善 SOA 的超快动态增益特性. 一般可用增益恢复时间来衡量 SOA 的动态增益特性. 所谓增益恢复时间, 是指当一路输入光脉冲经过 SOA 有源区后, SOA 的增益从它的稳态值的 10% 上升到 90% 所需要的时间<sup>[5]</sup>. 增益恢复时间的大小直接决定了 SOA 用作全光信号处理输出的码型效应、输出消光比以及最高可实现的工作速率, 因而是 SOA 中非常重要的性能指标. 目前有大量的文献记载了缩短 SOA 增益恢复时间的方法, 如增大注入电流<sup>[6]</sup>, 使用长腔的 SOA<sup>[7]</sup> 或者增加一路连续光(通常叫做保持光)或辅助光<sup>[5]</sup>等等, 但这些结论大都是从实验中得出的, 很少有文献从理论上给出增益恢复时间的解析表达式. 本文引入有效增益恢复时间的概念, 推导出了有效增益恢复时间的解析表达式, 可以作为寻求缩短增益恢复时间方法的理论依据. 同时针对 SOA 在交叉增益调制型全光波长转换的应用, 计算分析了

SOA 的增益恢复时间和注入电流、探测光功率、有源区长度等参数的关系, 实验测试了不同条件下的 SOA 增益恢复时间, 实验结果与理论分析结果基本符合.

## 2. 理论模型

下面分析交叉增益调制型波长转换器的理论模型.

SOA 载流子浓度的变化与注入 SOA 光功率变化的关系满足速率方程如下<sup>[8]</sup>:

$$\frac{\partial N(z, t)}{\partial t} = \frac{I}{eV} - \frac{N(z, t)}{\tau_c} - \sum_{i=1,2} \frac{\Gamma a [N(z, t) - N_i]}{A h c / \lambda_i} P_i(z, t), \quad (1)$$

其中  $I$  为注入电流,  $e$  为电子电量,  $V$  为 SOA 有源区的体积,  $\tau_c$  为 SOA 载流子寿命,  $\Gamma$  为 SOA 限制因子,  $a$  为增益因子,  $N_i$  为 SOA 透明载流子浓度,  $h$  为 Planck 常数,  $i = 1, 2$  分别代表信号光和探测光, 在 SOA 中沿  $z$  方向的光功率为  $P_i(z, t)$ ,  $\lambda_i$  为波长,  $A$  为 SOA 有源区截面积,  $c$  为光在真空中的速率.

注入 SOA 光功率沿 SOA 的  $z$  轴方向传播变化满足传输方程可表示为

$$\frac{\partial P_i(z, t)}{\partial z} = \Gamma a [N(z, t) - N_i] \times P_i(z, t) - \alpha_{in} P_i(z, t), \quad (2)$$

\* 国家重点基础研究发展规划项目(批准号: G2000036605), 国家高技术研究发展计划(批准号: 2002AA312160), 武汉市青年晨光人才计划(批准号: 2003500201602) 和国家自然科学基金(批准号: 60407001)资助的课题.

其中  $\alpha_{in}$  为 SOA 的损耗系数,为简化分析,假定  $\alpha_{in}$  可以忽略,将方程(1)沿 SOA 的  $z$  轴积分,同时把 SOA 看成一点,可以得到

$$\frac{dh}{dt} = \frac{g_0 L - h}{\tau_e} - \left[ \frac{P_1}{E_{sat,1}} + \frac{P_2}{E_{sat,2}} \right] [\exp(h) - 1], \quad (3)$$

其中  $g_0 = \Gamma a \left( \frac{I\tau_c}{eV} - N_t \right)$  为小信号增益系数,  $h(t)$  为功率增益函数因子,满足

$$h(t) = \int_0^L \Gamma a (N - N_t) dz = \Gamma a (N - N_t) L,$$

信号光和探测光的饱和能量对应为  $E_{sat,i} = hcA / (\lambda_i a \Gamma)$ ,  $i=1, 2$ . 记  $F(h) = \exp(h) - 1$ . 假设信号光在  $t=0$  时刻达到峰值功率,这时由于受激辐射和增益饱和效应,增益迅速降低到最小值记为  $G_0$ ,当信号脉冲过后,信号功率  $P_1=0$ ,这时增益开始慢慢恢复到稳态值  $G_s$ ,记  $G_s = \exp(h_s)$ . 当探测光功率相对信号光功率很小时,  $h_s$  近似等于小信号增益函数因子,即  $h_s = g_0 L$ . 将函数  $F(h)$  在  $h_s$  处用一阶泰勒展开得到近似公式

$$\frac{dh}{dt} = \frac{g_0 L - h}{\tau_e} - \frac{P_2}{E_{sat,2}} [F(h_s) + F'(h_s)(h - h_s)]. \quad (4)$$

方程(4)描述了增益从初始值恢复到稳态值,从一个简单的指数函数分布,该函数的特征值用时间常数  $\tau_{eff}$  来表示

$$\frac{1}{\tau_{eff}} = \frac{1}{\tau_e} + \frac{P_2}{E_{sat,2}} \exp \left[ \Gamma a \left( \frac{I\tau_c}{eV} - N_t \right) L \right], \quad (5)$$

这里,将  $\tau_{eff}$  定义为有效增益恢复时间,表征增益恢复的快慢.(5)式即有效增益恢复时间的解析表达式.可以看出,SOA 的有效增益恢复时间除了和 SOA 自身的载流子寿命有关外(载流子寿命越长,有效增益恢复时间也越长),还和 SOA 的注入电流、探测光功率、有源区长度等参数有关,该公式能够合理解释文献[5—7]的实验结论.

求解方程(4)得到

$$h(t) = g_0 L + \left( \frac{Ihc}{e\lambda_1 P_1} - g_0 L \right) \exp \left( - \frac{1}{\tau_{eff}} t \right). \quad (6)$$

将方程(6)归一化后得到

$$H(t) = 1 - b \exp \left( - \frac{1}{\tau_{eff}} t \right), \quad (7)$$

其中  $b = 1 - \frac{Ihc}{e\lambda_1 P_1 g_0 L}$ ,  $H(t)$  表示  $t$  时刻增益与小信号增益的比值.

由  $H(t_{0.1}) = 10\%$  得到  $t_{0.1} = (0.1 + \ln b) \tau_{eff}$ , 由  $H(t_{0.9}) = 90\%$  得到  $t_{0.9} = (2.3 + \ln b) \tau_{eff}$ , 其中  $t_{0.1}$  和  $t_{0.9}$  分别表示增益达到稳态值的 10% 和 90% 的时间. 所以增益恢复时间  $\Delta t = t_{0.9} - t_{0.1} = 2.2 \tau_{eff}$ . 可见增益恢复时间  $\Delta t$  和有效增益恢复时间  $\tau_{eff}$  满足线性关系,所以为了方便模型计算和实验测量,下面只讨论增益恢复时间特性.

### 3. 理论计算分析

下面对交叉增益型波长转换器模型做数值模拟,其中信号光波长为 1550nm,探测光波长为 1540nm,为了在模拟中测出增益恢复时间,信号光用半高全宽(FWHM)为 25ps 的超高斯脉冲来模拟,在下面的图示中,  $P_0$  表示抽运功率的最大值,  $P_c$  表示探测光功率,  $I$  表示注入电流.

图 1 显示的是在不同的注入电流的条件下,SOA 的增益恢复情况.当注入电流  $I$  为 200mA 时,恢复时间为 27.5ps;  $I$  为 150mA 时,恢复时间为 45ps;  $I$  为 100mA 时,恢复时间为 82.5ps. 可以看出,注入电流越大,SOA 获得的增益也越大,同时恢复时间也相应缩短,增益恢复速率加快.(5)式可以说明这一点,另外从光子与载流子相互作用也可以解释,当注入电流增大时,载流子浓度也越大,使得载流子和光子的作用加强,从而达到增益的快速恢复.

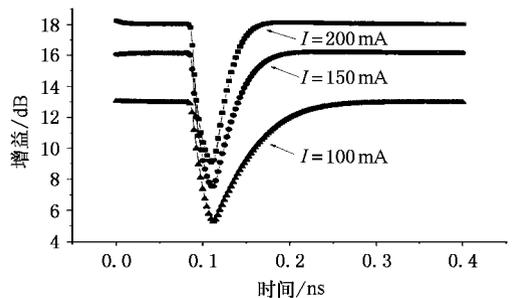


图 1 不同的注入电流条件下,SOA 的增益恢复

图 2 给出了在不同的探测光功率条件下,增益随时间变化的情况.当探测光功率为 7dBm 时,恢复时间是 77.5ps,探测光功率为 -10dBm 时,增益恢复时间是 110ps,可见探测光功率越大,增益恢复时间越短.这是因为增大探测光功率,使得光子数目增多,光子和载流子相互作用加强,所以增益恢复加快.但同时注意到随着探测光功率的增大,增益也在下降,所以要考虑 SOA 的增益恢复时间和增益之间

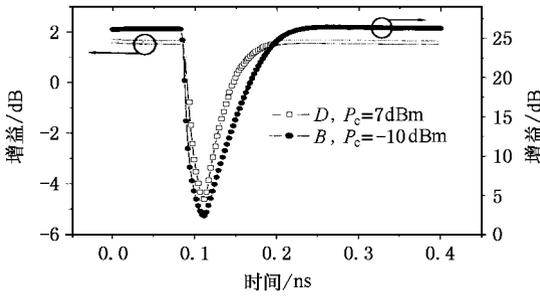


图 2 不同的探测光功率条件下, SOA 的增益恢复

的均衡.

图 3 描述了增益恢复时间随 SOA 有源区长度的变化情况,其中注入电流密度为  $25\text{kA}/\text{cm}^2$ . 可以看出长的 SOA 的增益恢复较快;从(5)式可知,SOA 的有源区越长,增益恢复时间就越短.

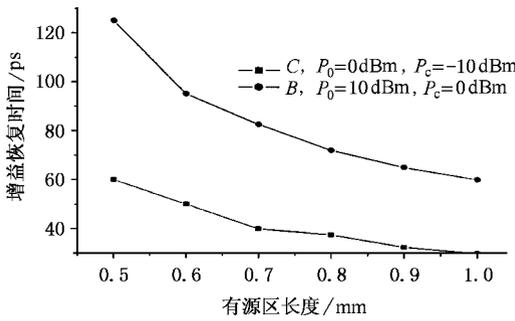


图 3 增益恢复时间随有源区长度的变化情况

### 4. 实验研究

基于交叉增益调制型波长转换器的实验装置如图 4 所示,抽运光是安立公司的 2.5Gbit/s 误码仪的发射机产生的,波长为  $1545.4\text{nm}$ ,探测光是可调激光器产生的连续光,波长为  $1540\text{nm}$ . 抽运光经过 EDFA 放大后,通过衰减器控制其输出功率,然后与探测光一起经过 3dB 耦合器耦合从端口 3 输出,将端口 3 与 SOA1 相连就是用 SOA1 实现波长转换,与 SOA2 相连就是用 SOA2 实现波长转换,可调滤波器滤掉抽运光频率分量,只输出探测光频率分量,送至光示波器或者光谱仪进行分析.

下面分别对两个不同的 SOA 进行实验,SOA1 采用混合应变量子阱结构,端面反射率为  $10^{-4}$  量级,SOA2 是体材料结构,有源区采用斜腔结构,端面反射率在  $10^{-6}$  量级.

首先对 SOA1 进行波长转换实验,输入抽运光、

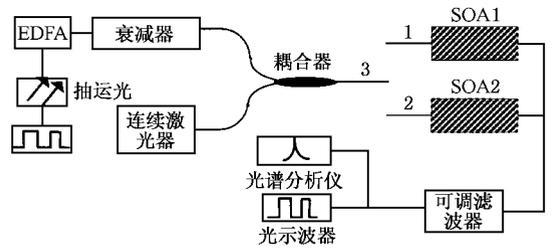


图 4 基于交叉增益调制型波长转换器的实验装置

输出探测光如图 5 所示 (a)显示的是输入抽运光脉冲 (b)显示输入探测光功率为  $-14.00\text{dBm}$  时,输出探测光功率,测得上升时间为  $245\text{ps}$  (c)显示输入探测光功率为  $-10.77\text{dBm}$  时,输出探测光功率,测得上升时间为  $147\text{ps}$ . 实验中,我们用光示波器测量的是转换后的探测光功率的上升时间,而非增益恢复时间,但由于输入探测光是连续光,输出探测光功率的变化趋势与增益的变化趋势完全一致,所以把测量的输出探测光功率的上升时间近似等同于增益恢复时间,在后面的测量中,都用增益恢复时间来表述.

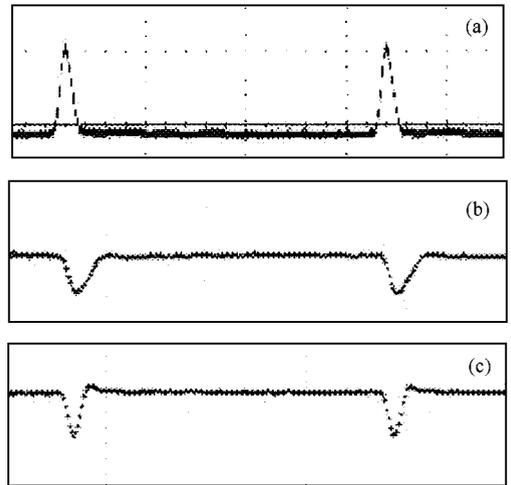


图 5 对 SOA1 进行波长转换实验的结果 (a)输入抽运光脉冲,峰值功率为  $10\text{dBm}$  (b)输入探测光功率为  $-14.00\text{dBm}$  时,上升时间为  $245\text{ps}$  (c)输入探测光功率为  $-10.77\text{dBm}$  时,上升时间为  $147\text{ps}$

在不同注入电流情况下,测得的 SOA1 增益恢复时间如图 6 所示,抽运光的平均功率为  $-4.64\text{dBm}$ ,可以看出,增益恢复时间随注入电流的增加而减小,图中的两条曲线对应探测光功率分别为  $-14.00\text{dBm}$  和  $-10.77\text{dBm}$ ,可见在相同的注入电流情况下,探测光功率越大,则增益恢复时间越短.

下面测量采用体材料结构的 SOA2 的增益恢复时间,抽运光的平均功率为 0.78dBm,从图 7 可以看出,增益恢复时间随注入电流的增加而减小,图中的两条曲线对应探测光功率分别为 4.8dBm 和 1.4dBm,可见在相同的注入电流情况下,探测光功率越大,则增益恢复时间越短。

通过对 SOA1 和 SOA2 的增益恢复时间的测量,我们知道了增大探测光功率和增大注入电流可以缩短增益恢复时间,使之能够应用于高速通信系统,第三部分的理论计算也得出了同样的结论,而所有这些结论都可以从(5)式中得到合理的解释。

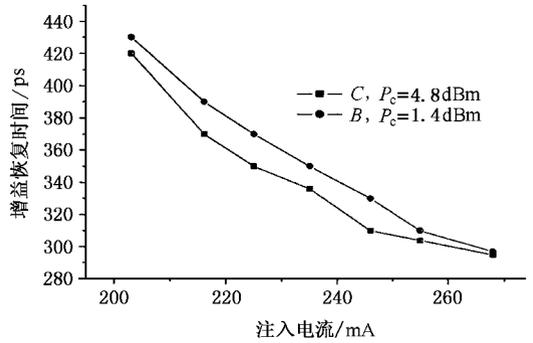


图 7 SOA2 的增益恢复时间随注入电流的变化

## 5. 总 结

本文提出 SOA 的有效增益恢复时间的概念,同时推导出其解析表达式,用数值模拟得出 SOA 的增益恢复时间分别随注入电流、探测光功率、SOA 有源区长度的增大而缩短;实验结果证实了上述结论(如增加注入电流或者增加探测光功率,可以缩短恢复时间),从而验证了有效增益恢复时间解析表达式的合理性,在进行系统设计或者器件设计时,该表达式可以作为考虑增益恢复时间的依据。

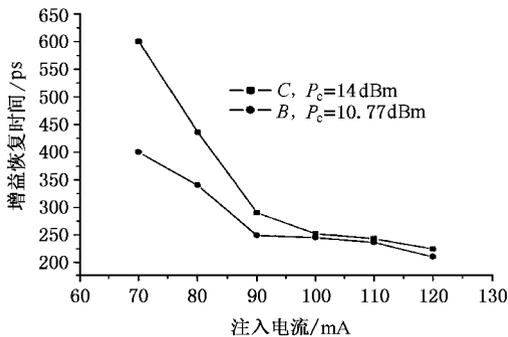


图 6 SOA1 的增益恢复时间随注入电流的变化

- [ 1 ] Zhang X L *et al* 2001 *Chin. Phys.* **10** 124  
 [ 2 ] Zhang X L *et al* 2000 *Acta Phys. Sin.* **49** 741 [ in Chinese ] 张新亮等 2000 物理学报 **49** 741 ]  
 [ 3 ] Durhuus T *et al* 1996 *J. Lightwave Technology* **14** 942  
 [ 4 ] Wu J W *et al* 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 1105 [ in Chinese ] 吴建伟

等 2004 物理学报 **53** 1105 ]

- [ 5 ] Talli G *et al* 2003 *IEEE J. Quantum Electronics* **39** 1305  
 [ 6 ] Manning R J *et al* 1994 *Electronics Letters* **30** 1233  
 [ 7 ] Girardin F *et al* 1998 *IEEE Photonics Technology Letters* **10** 784  
 [ 8 ] Agrawal G P *et al* 1989 *IEEE J. Quantum Electronics* **25** 2297

# Experimental and theoretical study on gain dynamics of SOA<sup>\*</sup>

Dong Jian-Ji Zhang Xin-Liang Huang De-Xiu

(*Department of Optoelectronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China*)

(Received 22 April 2004; revised manuscript received 24 May 2004)

## Abstract

A new conception of effective gain recovery time of semiconductor optical amplifier (SOA) was brought forward, and a simple analytical expression for the gain recovery time was derived. Factors that affect gain recovery time, such as bias current, probe power and device length were analyzed respectively on the base of application of SOA to the cross gain modulation wavelength conversion. Gain recovery time was measured experimentally. It is shown that the experimental result agrees well with the theoretical calculation.

**Keywords** : semiconductor optical amplifier (SOA), gain recovery time, all-optical wavelength converter (AOWC)

**PACC** : 4265P, 4255P, 4265K

---

<sup>\*</sup>Project supported by the State Key Development Programme for Basic Research of China (Grant No. G2000036605), the National High Technology Development Programme of China (Grant No. 2002AA312160), Wuhan Youth Chenguang Talent Project (Grant No. 2003500201602) and the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60407001).