

文章编号: 0258-7025(2003)09-0775-04

半导体光放大器(SOA)皮秒增益和 折射率非线性的数值模拟

洪 伟, 黄德修, 孙军强, 刘德明

(华中科技大学光电子工程系, 湖北武汉 430074)

摘要 从速率方程出发, 采用分段模型对半导体光放大器(SOA)的皮秒增益和折射率非线性进行了数值模拟, 具体分析了注入光脉冲引起的载流子浓度的变化、输出光脉冲时域波形的畸变、注入光脉冲引起的增益和位相变化, 以及输出光脉冲上的频率啁啾。

关键词 光电子学; 半导体光放大器(SOA); 增益和折射率非线性; 自相位调制(SPM); 频率啁啾

中图分类号 TN 365 **文献标识码** A

Numerical Simulation of Pico-second Gain and Index Nonlinearities in Semiconductor Optical Amplifiers (SOAs)

HONG Wei, HUANG De-xiu, SUN Jun-qiang, LIU De-ming

(Department of Opto-electronics Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China)

Abstract Pico-second gain and refractive index nonlinearities in semiconductor optical amplifiers (SOAs) were simulated using a multi-section model from the start of the rate equation. Carrier density variation induced by pulse injection, aberration of the temporal profile of the output pulse, gain and phase change induced by pulse injection, and frequency chirp on the output pulse were analyzed.

Key words optoelectronics; semiconductor optical amplifier (SOA); gain and index nonlinearities; self-phase modulation (SPM); frequency chirp

1 引 言

半导体光放大器(SOA)由于具有增益谱宽、非线性系数高、功耗低和易于集成的优点, 有可能成为未来高速大容量全光网中的关键器件。单个 SOA 和基于 SOA 的干涉型器件在全光信号处理(2R 或 3R 再生、波长转换、光时分复用等)方面的应用得到了广泛的研究^[1~3], 而 SOA 的皮秒增益和折射率非线性是其实现这些功能的关键。短脉冲通过 SOA 时, 其增益迅速下降然后又缓慢恢复, 这是由增益与载流子浓度的相关性引起的; 与此同时由于 SOA 有源区有效折射率与载流子浓度的相关性, 注入脉冲还会引起相应的自身的位相变化——自相位

调制, 因而在放大后的脉冲上会产生频率啁啾。国内 SOA 及其应用研究才刚刚起步, 对其增益和折射率非线性还缺乏深刻的认识。

2 基本方程和数值模型

当入射光脉冲的脉宽大于几个皮秒时, 可以认为载流子浓度服从准稳 Fermi-Dirac 分布, 可以忽略载流子加热(CH)、光谱烧孔(SHB)等效应; 另外考虑到在深饱和状态下, 放大的自发辐射(ASE)受到很强的抑制, 忽略 ASE 的影响是合理的。如果采用载流子寿命 τ 来描述总的自发辐射和非辐射复合速率, 载流子浓度的速率方程和光功率放大方程可

收稿日期: 2002-04-16; 收到修改稿日期: 2002-07-09

基金项目: 国家 973 项目(项目编号: G2000036605)资助课题。

作者简介: 洪伟(1974—), 女, 华中科技大学光电子工程系博士研究生, 主要从事半导体光放大器及其应用方面的研究。

E-mail: optocat@yahoo.com.cn

以表示为^[4~6]

$$\begin{aligned}\frac{\partial N(z,t)}{\partial t} &= \frac{J}{qd} - \frac{N(z,t)}{\tau} - \frac{\Gamma g P(z,t)}{h\nu A} \\ \frac{\partial P(z,t)}{\partial z} &= \Gamma g P(z,t) - \alpha_D P(z,t)\end{aligned}\quad (1)$$

这里, t 为随脉冲运动的坐标系下的时间, z 为光传播方向; N 为 SOA 有源区中的载流子浓度; P 为其中的光功率; J 为注入电流密度; q 为电子电量; d 为有源区的厚度; Γ 为模场限制因子; h 为 Planck 常数; A 为有源区横截面积; ν 为光脉冲的中心频率; α_D 为 SOA 有源区的损耗系数; g 为增益系数, 它与载流子浓度及波长有关, 可以由下式模拟^[5]

$$\begin{aligned}g &= g_N(N - N_t) - r_2(\lambda - \lambda_p)^2 + r_3(\lambda - \lambda_p)^3 \\ \lambda_p(N_0) &= \lambda_{\text{ref}} - k_0(N_0 - N_{\text{ref}})\end{aligned}\quad (2)$$

其中 g_N 为微分增益; N_t 为透明载流子浓度; λ 为入射光波的波长; r_2 为与增益谱带宽有关的常数; r_3 为与增益谱的不对称性有关的常数; λ_p 为无光入射稳态载流子浓度等于 N_0 时的增益峰值波长, λ_{ref} 为无光入射稳态载流子浓度等于 N_{ref} 时的参考增益峰值波长; k_0 为波长漂移系数。另外, τ 与载流子浓度的关系为: $c_1 N + c_2 N^2 + c_3 N^3 = N/\tau$, c_1 代表缺陷和捕获中心引起的非辐射复合系数, c_2 为双分子复合系数, c_3 为 Auger 复合系数。

模拟中采用了 SOA 的分段模型, 如图 1 所示, 即将整个 SOA 看成由 n 个子段串连而成, 当 n 足够大时, 可近似认为在这些子段中载流子浓度的分布是均匀的, 这一模型可以模拟 SOA 有源区中载流子浓度 N 的空间 (z 向) 和时间变化。若 i 为时域采样点的序号, j 为空间子段的序号, 根据增益的定义有

$$\begin{aligned}G_{i,j} &= \frac{P_{i,j+1}}{P_{i,j}} = \exp[\Gamma g_N(N_{i,j} - N_t - N_{\text{add}}\Delta z - \alpha_D\Delta z)] \\ G_i &= \frac{P_{i,\text{out}}}{P_{i,\text{in}}} = \frac{P_{i,n+1}}{P_{i,1}} = \prod_{j=1}^n \frac{P_{i,j+1}}{P_{i,j}} = \prod_{j=1}^n G_{i,j}\end{aligned}\quad (3)$$

其中 $N_{\text{add}} = \frac{r_2}{g_N}(\lambda - \lambda_p)^2 - \frac{r_3}{g_N}(\lambda - \lambda_p)^3$ 表示由增益色散引起的附加透明载流子浓度。由于 SOA 有源区有效折射率与载流子浓度的相关性, 注入脉冲还会引起自身的位相变化

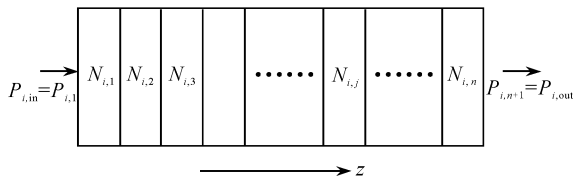


图 1 SOA 分段模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of SOA multi-section model

$$\Delta\phi_i = -\frac{\alpha_L}{2} \cdot \ln\left(\frac{G_i}{G_0}\right)\quad (4)$$

其中 G_0 为小信号增益, $\alpha_L = -\frac{4\pi}{\Gamma a \lambda} \frac{d\bar{n}}{dN}$ 为线宽加强因子。产生的频率啁啾为

$$\Delta f_i = -\frac{1}{2\pi} \cdot \frac{d(\Delta\phi_i)}{dt}\quad (5)$$

3 计算结果及分析

计算中采用的参数值如表 1 所示。假设入射光脉冲为无啁啾的理想 Gauss 脉冲, 波长 1550 nm, FWHM 脉宽为 10 ps, 注入电流 100 mA。

表 1 计算采用的参数值

Table 1 SOA parameters used in simulation

Length of active region (L)	500 μm
Width of active region (w)	2 μm
Thickness of active region (d)	0.2 μm
Facet reflectivity (R_1, R_2)	0
Differential gain (g_N)	$6.3 \times 10^{-20} \text{ m}^2$
Loss of active region (α_D)	$4.0 \times 10^3 \text{ m}^{-1}$
Transparent carrier density (N_0)	$1.0 \times 10^{23} \text{ m}^{-3}$
Mode confinement factor (Γ)	0.35
Referential injected current (I_{ref})	100 mA
Referential peak-gain wavelength (λ_{peak})	1.55 μm
Peak-gain wavelength shift coefficient (k_0)	$3.2 \times 10^{-32} \text{ m}^{-4}$
Linewidth enhancement factor (α)	3.5
Nonradiative recombination coefficient (c_1)	$1.5 \times 10^8 \text{ s}^{-1}$
Bimolecular recombination coefficient (c_2)	$5 \times 10^{-15} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$
Auger recombination coefficient (c_3)	$9.0 \times 10^{-41} \text{ m}^6 \text{ s}^{-1}$
Gain constant r_2	$2.0 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$
Gain constant r_3	$1.8 \times 10^{26} \text{ m}^{-4}$
Number of sub-sections (n)	41

3.1 载流子浓度的时、空 (z 向) 变化以及输出光脉冲波形的畸变

当光脉冲通过 SOA 传播时, 由于对光脉冲的放大作用, SOA 有源区中不同空间位置 (只讨论 z 向) 的载流子浓度会随时间发生不同的变化。输入光脉冲峰值功率分别为 0 dBm 和 10 dBm 时的模拟计算结果如图 2(a), (b) 所示, 图中给出了几个具有代表性的子段中载流子浓度随时间的变化曲线。从中可以看到: 在脉冲的上升沿到达之前, 各子段中的载流子浓度保持其小信号值; 当脉冲的上升沿到达时, 载流子浓度就开始迅速下降, 并且脉冲的峰值功率越高, 载流子浓度下降得越快, 甚至在下降沿到达之前就已经发生饱和, 因此脉冲的不同部分将获得不同的增益, 输出光脉冲波形的畸变由此产生。在有源区后部, 载流子浓度的下降更为显著, 这显然是

由于放大后的脉冲会消耗更多的载流子。图 3(a), (b)分别给出了输入光脉冲峰值功率分别为 0 dBm 和 10 dBm 时输入、输出光脉冲的时域波形。可以看到原来对称的 Gauss 脉冲经过 SOA 放大后, 波形不再对称, 脉冲的上升时间明显小于下降时间, 在

随脉冲运动的坐标系下, 输出脉冲的峰值相对输入脉冲的峰值有一个小的时移, 形象地说来就是脉冲向前“倾斜”了。而且峰值功率越大时移量越大。因为峰值功率越大, 载流子浓度消耗得越快, 因而增益下降得越快, 输出脉冲也就越早达到峰值。

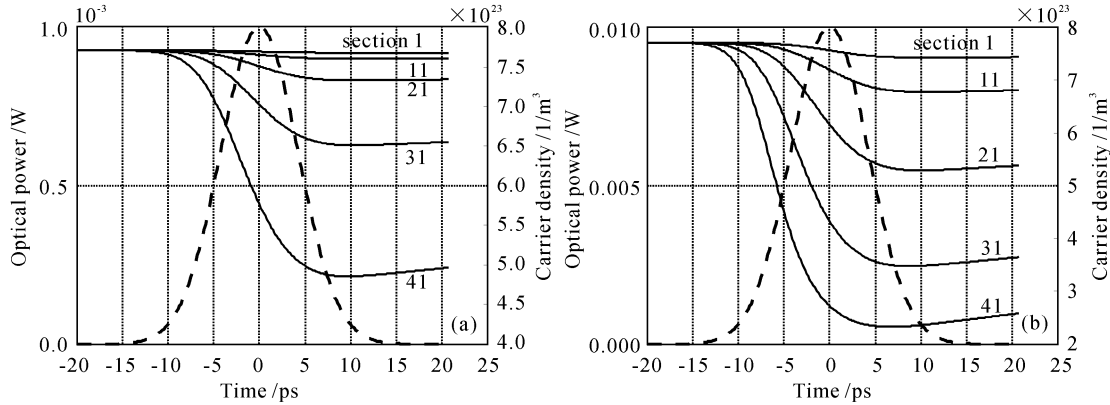


图 2 第 1,11,21,31,41 子段中载流子浓度随时间的变化

输入光脉冲峰值功率分别为:(a) 0 dBm;(b) 10 dBm (虚线所示为输入光脉冲时域的波形)

Fig.2 Temporal variation of carrier density in 1st, 11th, 21st, 31st, 41st sub-section for the input pulse peak power (a) 0 dBm and (b) 10 dBm (dash line; input pulse temporal profile)

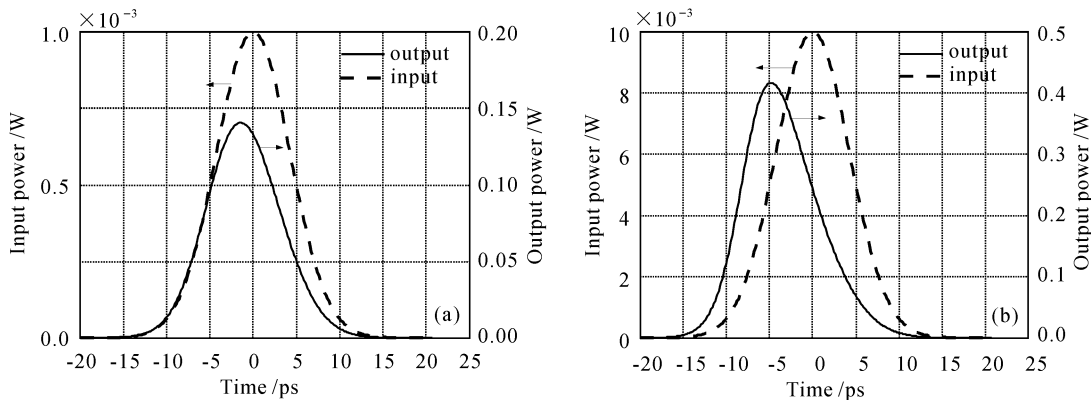


图 3 输入、输出光脉冲时域的波形

输入光脉冲峰值功率分别为:(a) 0 dBm;(b) 10 dBm

Fig.3 Input and output pulse temporal profile for the input pulse peak power (a) 0 dBm; (b) 10 dBm

3.2 增益、位相和频率啁啾随时间的变化

输入光脉冲峰值功率为 0 dBm 和 10 dBm 时, 增益和位相随脉冲变化的模拟计算结果分别如图 4 (a), (b)所示。从图 4(a)中可以看出, 增益的下降与脉冲几乎是同时的, 而脉冲通过后增益恢复的斜率却很小, 表明恢复过程要缓慢得多; 输入光脉冲的峰值功率越高, 增益下降得越多, 也越快, 输入光脉冲的峰值功率为 0 dBm 时, 约 15 ps 内增益从小信号的约 23.4 dB 下降到脉冲通过后的约 19.8 dB, 下降了约 3.6 dB; 输入光脉冲的峰值功率为 10 dBm

时, 约 15 ps 内增益从小信号的约 23.4 dB 下降到脉冲通过后的约 11 dB, 下降达~12.4 dB, 由于增益与有源区有效折射率都与载流子浓度相关, 增益随光脉冲波形变化的同时必然存在着折射率变化引起的位相随光脉冲波形的变化, 如图 4(b)所示, 这就是 SOA 中的自相位调制(SPM)效应。输入光脉冲的峰值功率为 0 dBm 时, 脉冲通过前后产生的位相变化约为 1.46 rad (0.46π); 输入光脉冲的峰值功率为 10 dBm 时, 脉冲通过前后产生的位相变化约为 5 rad (1.6π)。

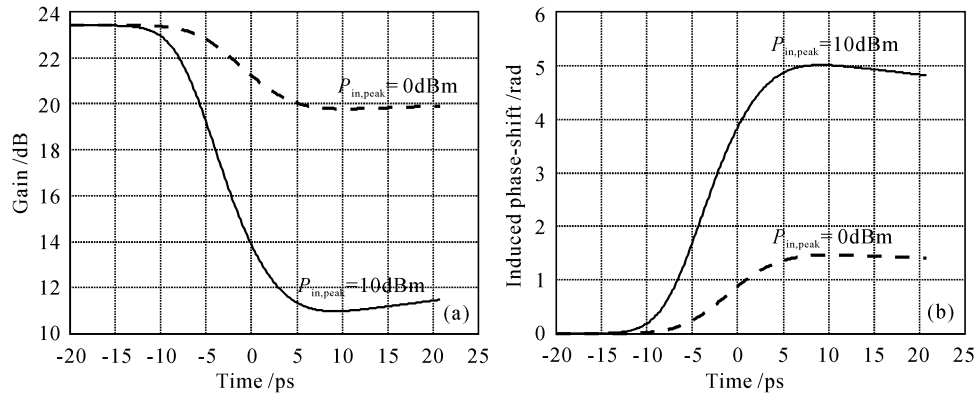


图 4 输入光脉冲峰值功率分别为 0 dBm 和 10 dBm 时增益(a)及位相(b)随时间的变化

Fig. 4 Gain (a) and phase shift (b) temporal variation for 0 dBm and 10 dBm input pulse peak power, respectively

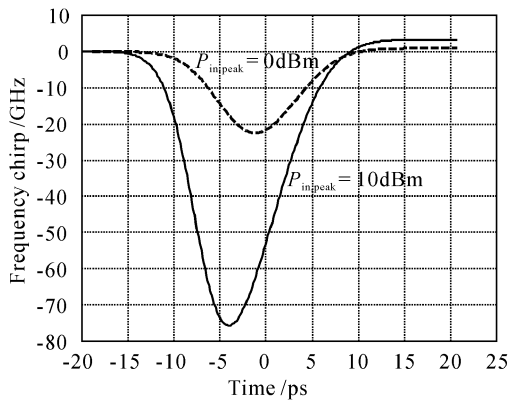


图 5 输入光脉冲峰值功率分别为 0 dBm 和 10 dBm 时频率啁啾随时间的变化

Fig. 5 Frequency chirp temporal variation for 0 dBm and 10 dBm input pulse peak power, respectively

SPM 效应必然使输出光脉冲上产生频率啁啾, 输入光脉冲峰值功率为 0 dBm 和 10 dBm 时, 输出光脉冲上的频率啁啾随时间变化的模拟计算结果如图 5 所示。计算结果表明, 整个输出光脉冲上几乎均产生了不同程度的负啁啾, 脉冲拖尾处少量的正啁啾来源于脉冲通过后载流子浓度的恢复, 这与 Gauss 型短脉冲在光纤中传播时, 光纤中的 SPM 效应引起的频率啁啾是不同的, 后者在脉冲的上升沿产生负啁啾, 在下降沿产生正啁啾, 而峰值处啁啾为零^[7]。另外, 计算结果表明对于一定的脉宽, 产生频率啁啾的大小是与输入光脉冲的峰值功率有关的, 输入光脉冲的峰值功率为 0 dBm 时, 最大频移量为 -22.5 GHz, 输入光脉冲的峰值功率为 10 dBm 时, 最大频移量可达 -75.5 GHz。

4 结 论

从短脉冲注入下 SOA 动态增益特性的模拟计算结果中可以看出: 1) 由于从脉冲的上升沿到下降沿, 增益迅速下降, 甚至在上升沿就已经发生饱和, 输出光脉冲的时域波形向前倾斜; 2) 增益的下降与脉冲的注入几乎是同时的, 脉冲通过后增益则缓慢恢复; 3) 几乎整个脉冲上均产生不同程度的负啁啾, 对于脉宽 10 ps, 峰值功率 10 dBm 的输入光脉冲, 最大频移量可达约 -75.5 GHz。

参 考 文 献

- 1 R. J. Manning, A. D. Ellis, A. J. Poustie *et al.*. Semiconductor laser amplifiers for ultrafast all-optical signal processing [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1997, **14** (11):3204~3216
- 2 M. Eiselt, W. Pieper, H. G. Weber. SLALOM: semiconductor laser amplifier in a loop mirror [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1995, **13**(10):2099~2111
- 3 A. D. Ellis, D. M. Patrick, D. Flannery *et al.*. Ultra-high-speed OTDM networks using semiconductor amplifier-based processing nodes [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1995, **13**(5):761~770
- 4 Kristof Obermann. All-optical Wavelength Conversion Based on Cross-gain Modulation and Four-wave Mixing in Semiconductor Optical Amplifiers [M]. Berlin: Wissenschaft und Technik Verlag, 1999
- 5 Zhang Xinliang. All-optical Wavelength Conversion Based on Semiconductor Optical Amplifiers [D]. Department of Optoelectronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, 2000 (in Chinese)
- 6 Tadashi Saitoh, Takaaki Mukai. Gain saturation characteristics of traveling-wave semiconductor laser amplifiers in short optical pulse amplification [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1990, **26**(12):2086~2094
- 7 Liu Deming, Xiang Qing, Huang Dexiu. Fiber Optics [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1995