

文章编号: 0258-7025(2003)01-0017-05

# 增益钳制半导体光放大器的静态特性分析

黄德修, 王 惠, 刘德明

(华中科技大学光电子工程系, 湖北 武汉 430074)

**摘要** 采用增益钳制半导体光放大器(GC-SOA)的时域模型, 计算并分析了 GC-SOA 的静态特性。分析表明, 在同样的注入电流下 GC-SOA 较普通 SOA 的 3dB 饱和输出功率有所提高, 并且在 GC-SOA 的增益饱和之前其增益一直稳定在阈值处。还用外腔反馈的方法构成 GC-SOA, 并对其静态特性进行实验研究。

**关键词** 光电子技术; 半导体光放大器; 增益钳制; 激光振荡

**中图分类号** TN 248.4 **文献标识码** A

## Static Character Analysis and Experiment of Gain-clamped SOA

HUANG De-xiu, WANG Hui, LIU De-ming

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

**Abstract** Time-domain GC-SOA model is used to analysis the static character of GC-SOA. It is proved that the 3dB-saturation output power of GC-SOA is higher than the conventional SOA, and its gain is much more stable than the conventional SOA before saturation. The external feedback GC-SOA is set up, and the experiments on it show the special characters of GC-SOA.

**Key words** optoelectronic technique; semiconductor optical amplifier (SOA); gain-clamped; lasing

## 1 引言

普通的半导体光放大器(SOA)在 WDM 系统中用作线路放大器时的一个主要问题是由交叉增益调制(XGM)引起的信道间串扰<sup>[1]</sup>, 在多信道传输的 SOA 光开关模块中同样存在类似的问题<sup>[2]</sup>。除此之外, 普通的 SOA 用作模拟信号的放大时, 当输出光功率接近其饱和输出功率时会引起较大的非线性畸变。无论是交叉增益调制还是非线性畸变都是由于 SOA 的增益饱和引起的。因此, 要解决这些问题就必须稳定 SOA 的增益, 提高 SOA 的饱和输出功率。

增益钳制的半导体光放大器(GC-SOA)通过在普通 SOA 的增益谱边缘引入一个钳制激光, 从而达到钳制载流子浓度、稳定增益的目的<sup>[3~5]</sup>。一旦激光振荡开始, 便将工作介质的整个增益谱钳制在激光的阈值水平上。由于半导体增益谱的均匀展宽

性质, 任何不同于激光频率的信号增益也就被锁定。GC-SOA 的增益在输入光功率不是非常大的情况下不受其影响。增益的锁定可以一直维持到输入信号功率大到足以将钳制激光熄灭, 这一最大输入功率临界值便决定了增益钳制半导体光放大器的输入功率范围。相关实验表明, GC-SOA 中由交叉增益调制引起的信道间串扰和非线性畸变都很小<sup>[6,7]</sup>。本文首先从理论上分析了 GC-SOA 的静态性能, 然后通过外腔反馈的方法构成 GC-SOA, 并对其静态特性进行了实验研究。

## 2 理论研究

### 2.1 时域模型

GC-SOA 的时域模型<sup>[8]</sup>是建立在速率方程的基础上。模型采用 DBR 结构, 如图 1 所示。假设 Bragg 光栅只对激光光  $\lambda_{\text{las}}$  反射, 对其他波长尤其是

收稿日期: 2001-11-05; 收到修改稿日期: 2001-12-29

基金项目: 国家 973 计划项目(G2000036605)资助课题。

作者简介: 黄德修(1937. 10), 男, 教授, 博导, 主要从事光电子和光通信研究。E-mail: xxybgs@hust.edu.cn

信号光的反射率为 0, 并且假设信号光与栅制光的波长差足够大, 彼此之间不考虑四波混频。可以通过两个不同的光场来分析 GC-SOA。一个是激光光场, 假设它的光子浓度是均匀分布的(因为激光光场靠近增益谱边缘, 具有大的反射率和小的增益系数); 另一个是信号光场。

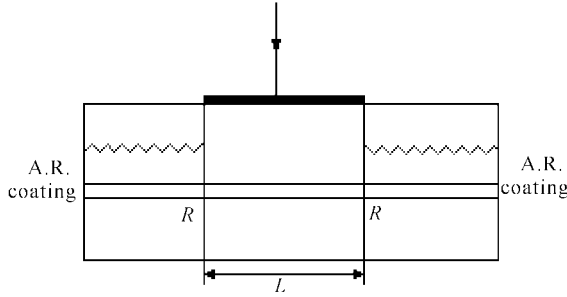


图 1 DBR 型 GC-SOA

Fig. 1 Schematic structure of a DBR-GC-SOA

为了简化研究, 假设 GC-SOA 中载流子浓度沿  $z$  轴方向均匀分布, 平均载流子浓度为  $N_0$ 。假设有源区中只有一个主激光模和一路信号光, 其平均光子浓度分别为  $S_l$  和  $S_{a0}$ , 并且在静态情况下不考虑增益的抑制。使用下列速率方程来描述 GC-SOA

$$\frac{dN_0}{dt} = \frac{I}{qV} - \frac{N_0}{\tau_n} - G_l S_l - G_a S_{a0} \quad (1)$$

$$\frac{dS_l}{dt} = G_l S_l - \gamma_{\text{las}} S_l + \beta B N_0^2 \quad (2)$$

其中  $I$  为注入电流,  $V$  为有源区的体积,  $\tau_n$  为载流子寿命,  $G_l$  和  $G_a$  分别为激光光和信号光的增益系数,  $S_l$  为激光光的光子浓度,  $S_{a0}$  为信号光的平均光子浓度,  $t$  为时间,  $\beta$  为自发发射因子,  $\gamma_{\text{las}}$  为激光器的内部损耗和镜面输出损耗之和,  $N_0/\tau_n$  为自发发射速率, 可表示为

$$N_0/\tau_n = A N_0 + B N_0^2 + C N_0^3 \quad (3)$$

$A, B, C$  分别代表单分子、双分子和俄歇复合系数。

$$G_{l,a} = G_{l,a}'(N_0 - N_t) \quad (4)$$

$$G_{l,a}' = \frac{dG_{l,a}}{dN} = \nu_g \Gamma \frac{dg_{l,a}}{dN} \quad (5)$$

$\Gamma$  为光场限制因子,  $dg_{l,a}/dN$  为激光光和信号光的微分增益系数,  $N_t$  为透明载流子浓度。式(1)中的  $S_{a0}$  为

$$S_{a0} = \frac{1}{L} \int_0^L S_a(z) dz = \frac{1}{L h \nu d w \nu_g} \int_0^L P(z) dz = \frac{P_{\text{in}}}{h \nu V} \frac{\exp\left[\left(G_a - \alpha_{\text{int}} \nu_g\right) \frac{L}{\nu_g}\right] - 1}{G_a - \alpha_{\text{int}} \nu_g} \quad (6)$$

$P_{\text{in}}$  为入射信号光的光功率,  $h$  为普朗克常量,  $\nu$  为信号光的频率。信号光的增益  $G$  可表示为

$$G = 10 \times \log \left\{ \exp \left[ G_a' (N_0 - N_t) \frac{L}{\nu_g} - \alpha_{\text{int}} L \right] \right\} \quad (7)$$

对于普通的 SOA, 由于不存在激光光, 因此(1)式可简化为

$$\frac{dN_0}{dt} = \frac{1}{qV} - \frac{N_0}{\tau_n} - G_a S_{a0} \quad (8)$$

增益  $G$  的表示方法如(7)式。

## 2.2 计算结果

在静态状况下,  $\frac{dN_0}{dt} = 0, \frac{dS_l}{dt} = 0$ , 通过迭代法解速率方程, 可计算出在不同情况下有源区内的平均载流子浓度和激光光的平均光子浓度, 及信号光的增益。根据激光器中的平均光子浓度和输出光功率之间的关系<sup>[9]</sup>

$$P_{\text{out}} = 10 \log [0.5 S_l R^{-0.5} (1-R) \omega \nu_g h \nu \cdot 10^3] \quad (9)$$

可得到激光光的输出光功率。计算中使用的参数如表 1。

表 1 计算中使用的参数

Table 1 Parameters used in the simulations

Parameter	Symbol	Value	Units
Length of active layer	$L$	400	$\mu\text{m}$
Stripe width	$w$	1.5	$\mu\text{m}$
Active layer thickness	$d$	0.1	$\mu\text{m}$
Differential gain coefficient of laser	$\frac{dg_l}{dN}$	$3.5 \times 10^{-8}$	$\mu\text{m}^2$
Lasing wavelength	$\lambda_{\text{las}}$	1.52	$\mu\text{m}$
Signal wavelength	$\lambda_{\text{sig}}$	1.558	$\mu\text{m}$
Transparency carrier density	$N_t$	$1.6 \times 10^6$	$\mu\text{m}^{-3}$
Effective group index of refraction in cavity	$n_g$	3.2	
Spontaneous emission factor	$\beta$	$2 \times 10^{-5}$	
Power confinement factor	$\Gamma$	0.2	
Internal waveguide losses	$\alpha_{\text{int}}$	$2 \times 10^{-3}$	$\mu\text{m}^{-1}$
Differential gain coefficient of signal	$\frac{dg_a}{dN}$	$4.63 \times 10^{-8}$	$\mu\text{m}^2$
Linear recombination coefficient	$A$	$10^8$	$\text{s}^{-1}$
Bimolecular recombination coefficient	$B$	100	$\mu\text{m}^3/\text{s}$
Auger recombination coefficient	$C$	$7.5 \times 10^{-5}$	$\mu\text{m}^6/\text{s}$

### 2.2.1 增益随输出光功率的变化曲线

图 2 为普通 SOA 和 GC-SOA ( $R = 0.1$ ) 在 40 mA 注入电流下增益随输出光功率的变化曲线。图

中右纵坐标是钳制激光的输出功率 ( $P_{las}$ )。可见, 普通 SOA 的增益随输出光功率的增加而出现饱和, 其 3 dB 饱和和输出功率(增益从它的饱和值下降 3 dB 所对应的输出功率)为 5.995 dBm。而 GC-SOA 在输出功率为 10.302 dBm 时增益才开始饱和, 较普通 SOA 的 3 dB 饱和输出功率增加了 4.3 dBm, 并且在开始饱和之前增益一直稳定在 14.35 dB。当激光光被熄灭后, GC-SOA 的增益迅速饱和, 并与普通 SOA 的增益曲线相重合, 此时 GC-SOA 退化为普通 SOA。

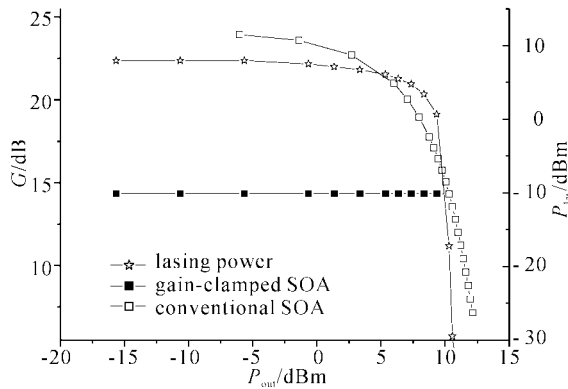


图 2 增益随输出光功率的变化曲线

Fig. 2 Gain versus output power of conventional SOA and GC-SOA

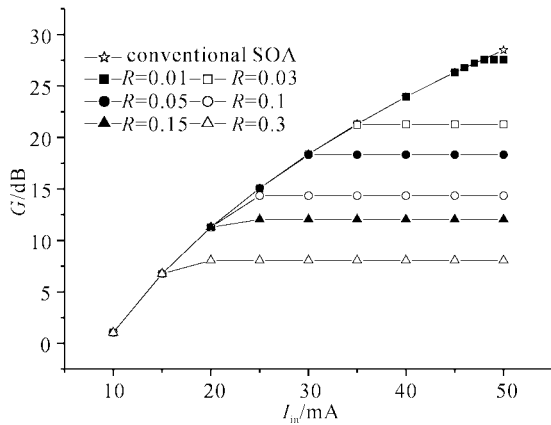


图 3 增益随注入电流的变化曲线

Fig. 3 Gain versus injected current

### 2.2.2 增益随注入电流的变化曲线

图 3 为 GC-SOA 在不同的端面反射率下增益随注入电流的变化曲线。可见, 端面反射率越高, GC-SOA 的阈值电流越低; 在同一端面反射率下, 当注入电流大于 GC-SOA 的阈值电流后, 增益就被钳制在阈值电流处的增益值, 不再随注入电流的变化而变化, 真正实现了增益的钳制。

### 2.2.3 熄灭钳制激光的注入光功率随注入电流的变化曲线

图 4 为熄灭钳制光所需的注入信号光功率随注入电流的变化曲线。在某一注入电流下, 加大信号光的注入光功率使得钳制激光的激光功率减小, 直到最终被信号光熄灭。GC-SOA 的这一特性被称为开关特性, 显然这一开关特性是针对激光的存在与否而言的。由图可见, 随注入电流的增加, 熄灭钳制激光所需的注入信号光功率也随之增加。

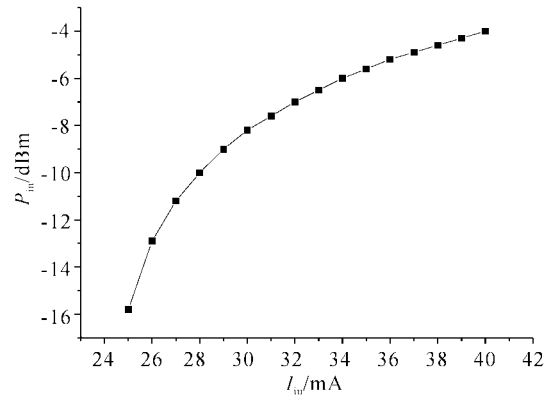


图 4 熄灭钳制光的注入光功率随注入电流的变化曲线

Fig. 4 Input power needed to eliminate lasing versus injected current

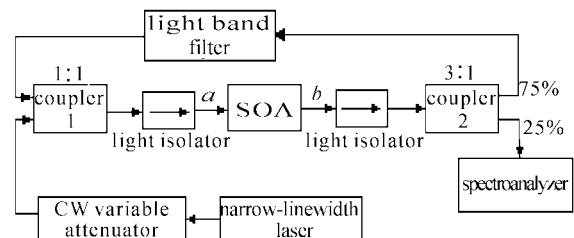


图 5 实验装置图

Fig. 5 Experiment setup

## 3 实验研究

### 3.1 实验装置

实验中所使用的 GC-SOA 结构为外腔反馈型, 实验装置如图 5 所示。窄线宽激光光源发射的光信号经连续可变衰减器将光信号功率减至所需要的信号功率, 经耦合器 1(耦合比为 1:1)和隔离器注入到 SOA 中。SOA 的输出光经隔离器和耦合器 2(耦合比为 3:1)后, 一部分光用于输出, 送至光谱分析仪, 另一部分光通过光带通滤波器反馈输入 SOA 形成钳制激光。SOA 两端加隔离器的作用是为了减小各光纤端面的反馈光, 抑制 F-P 振荡。这一外腔反馈的结构具有灵活的特点, 通过调整光带通滤波器

可以改变钳制激光的激光波长。

### 3.2 实验结果

#### 3.2.1 增益和饱和输出特性的测试

图 6(a)为信号光波长为 1535 nm, 钳制光波长为 1550 nm 时实验测得的在同样注入电流下 ( $I = 120$  mA) GC-SOA 和普通 SOA 的增益和饱和输出特性曲线。外腔反馈 GC-SOA 的饱和输出功率约等于无信号时的钳制光输出功率, 由图可见无信号时钳制光的输出光功率和 GC-SOA 的饱和输出功率都约为  $-5$  dBm。当钳制光被熄灭后, GC-SOA 的增益迅速饱和, 并衰减很快, 而且此时 GC-SOA 的增益特性与普通 SOA 的增益特性相重合。与普通的 SOA 相比, GC-SOA 的 3dB 饱和输出功率得

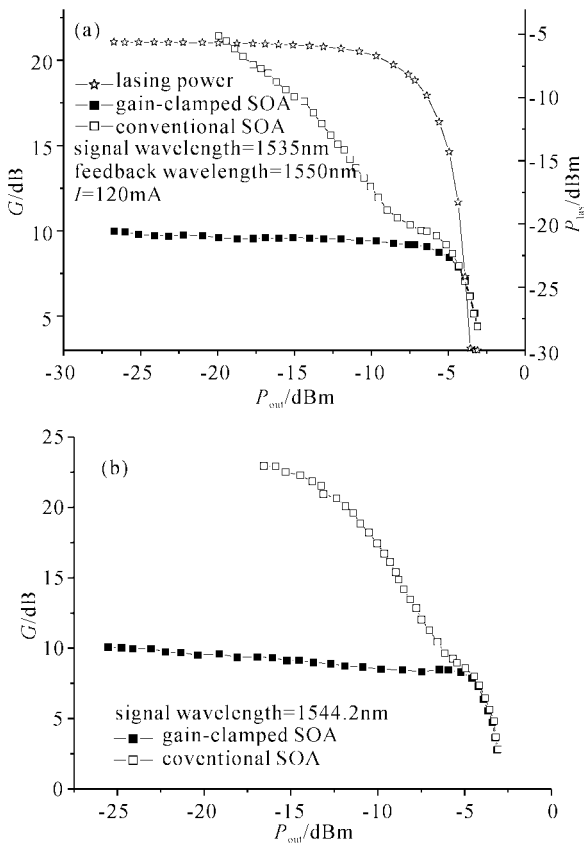


图 6 (a) 钳制光位于信号光右侧时 GC-SOA 和普通 SOA 的增益和饱和输出特性曲线; (b) 激光光位于信号光左侧的增益曲线

Fig. 6 (a) Experiment result of gain and saturation character of GC-SOA and conventional SOA when lasing wavelength is longer than signal wavelength; (b) Experiment result of gain and saturation character of GC-SOA and conventional SOA when lasing wavelength is shorter than signal wavelength

到了提高, 并且在增益未饱和之前 GC-SOA 的增益较普通 SOA 的增益稳定得多。但是 GC-SOA 的增益比普通 SOA 的增益要小得多, 可见增益的稳定和饱和输出功率的提高是以降低增益为代价的。

改变信号光波长到 1554.2 nm, 并将钳制光选在信号光的左侧 1528.8 nm 处, 在 120 mA 的注入电流下测得的 GC-SOA 和普通 SOA 的增益随输出光功率的变化曲线如图 6(b) 所示。

#### 3.2.2 GC-SOA 的阈值特性

GC-SOA 不同于普通 SOA 的一个重要特点是它具有阈值特性。GC-SOA 本质上是一个高阈值的半导体激光器, 当注入电流大于它的阈值电流时, 钳制激光振荡开始。此时 GC-SOA 的载流子浓度和增益被稳定在阈值处, 基本上不再随注入电流的变化而变化。进一步加大注入电流, 只能加大钳制光的激光功率, 而不会改变激光器的阈值增益。

图 7 为 GC-SOA 的增益  $G$  随注入电流  $I_{in}$  的变化曲线。由图可见, 当注入电流小于 GC-SOA 的阈值电流时, 增益随注入电流的增加而增加, 表现出与普通 SOA 相同的特点; 当注入电流大于 GC-SOA 的阈值电流后, 它的增益基本上不再随注入电流的变化而变化。

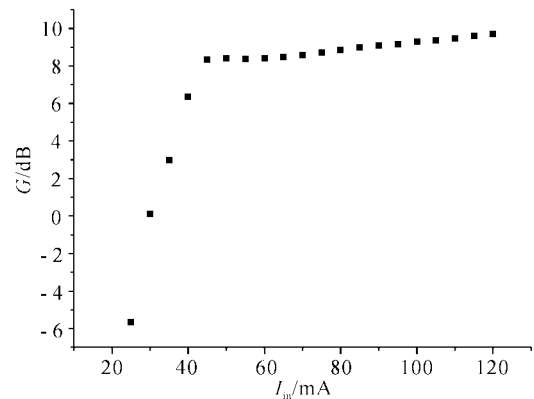


图 7 GC-SOA 的增益随注入电流的变化曲线  
Fig. 7 Gain of GC-SOA versus injected current on experiment

#### 3.2.3 GC-SOA 的开关特性

前面已经提及过, GC-SOA 的开关特性是相对于钳制光而言的, 钳制光的激光功率随注入光功率的变化而变化, 当注入光功率足够大时, 可以将钳制光熄灭。图 8 为熄灭钳制光所需的注入光功率随注入电流的变化曲线。注入电流的增加导致了无信号时钳制光功率的增加, 从而使得熄灭钳制光所需的注入光功率也随之增加。

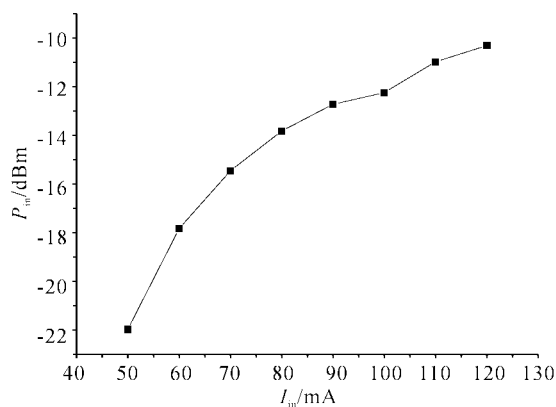


图 8 熄灭钳制光所需的注入光功率随注入电流的变化曲线

Fig. 8 Input power needed to eliminate lasing versus injected current on experiment

## 4 结 论

本文对增益钳制半导体光放大器的静态特性进行了理论计算和实验研究,显示了 GC-SOA 与普通 SOA 的一些特性。与普通 SOA 相比,它的增益较稳定,有较高的饱和输出功率,同时付出降低增益的代价。

### 参 考 文 献

- 1 H. E. Lassen, P. B. Hansen, K. E. Stubkjaer. Crosstalk in 1.5  $\mu\text{m}$  InGaAsP optical amplifiers [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1988, **6**(10):1559~1565
- 2 E. L. Goldstein, L. Eskildsen, A. F. Elrefaie. Performance implication of component crosstalk in transparent lightwave networks [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1994, **6**(5):657~660
- 3 B. Bauer, F. Henry, R. Schimpe. Gain stabilisation of a semiconductor optical amplifier by distributed feedback [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1994, **6**(2):182~185
- 4 L. F. Tiemeijer, P. J. A. Thijs, T. V. Dongen *et al.*. Reduced intermodulation distortion in 1300 nm gain-clamped MQW laser amplifiers [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1995, **7**(3):284~286
- 5 M. Bachmann, P. Doussiere, J. Y. Emery *et al.*. Polarisation-insensitive clamped-gain SOA with integrated spot-size convertor and DBR gratings for WDM applications at 1.55  $\mu\text{m}$  wavelength [J]. *Electron. Lett.*, 1996, **32**(22):2076~2077
- 6 D. T. Schaafsma, E. Miles, E. M. Bradley. Comparison of conventional and gain-clamped semiconductor optical amplifiers for wavelength-division-multiplexed transmission systems [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2000, **18**(7):922~925
- 7 L. F. Tiemeijer, G. N. van den Hoven, P. J. A. Thijs *et al.*. 1310-nm DBR-type MQW gain-clamped semiconductor optical amplifiers with AM-CATV-grade linearity [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1996, **8**(11):1453~1455
- 8 Jinying Sun, Geert Morthier, Roel Baets. Numerical and theoretical study of the crosstalk in gain clamped semiconductor optical amplifiers [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 1997, **3**(5):1162~1167
- 9 Huang Dexiu. *Semiconductor Optoelectronics* [M]. Chengdu: Press of University of Electronic Science and Technology of China, 1994