

半导体激光放大器的电路模型及 噪声特性分析*

毛陆虹^{1), 2)} 胡国驹²⁾ 粘 华¹⁾

1), 郑州大学电子工程系, 郑州 450052
2), 河南省基础及应用科学研究所, 郑州 450052

摘 要 给出了半导体激光(LD)放大器的电路模型, 使得对半导体激光放大器的特性可以用通用电路分析软件进行分析。用该模型对谐振型光放大器光功率输出特性与失谐关系进行了模拟分析, 模型的分析结果与已报道的理论和实验基本一致; 用该模型还对谐振光放大器的噪声进行了分析。

关键词 半导体激光放大器, 电路模型, 噪声。

1 引 言

半导体激光放大器有着广泛的应用前景, 其双稳和开关特性可用在光数字信号处理领域^[1-3], 亦可作为中继放大器和滤波器用于光通信系统^[4-7]。以往人们用计算机数值分析的方法得到光放大器的分析结果, 对光放大器的实验和设计起了指导作用。然而, 用一般的计算机数值分析的缺点是: 第一、很难与驱动电路同时进行分析; 第二、他人重复困难, 这不利于工程设计。

光放大器的电路模型使光放大器的寄生参量以及驱动电路, 例如电源、自动增益控制、自动频率控制电路可以统一地使用通用电路分析软件(如 SPICE 或者 SABER)完成。一旦模型建立, 该模型就可以视为一个器件, 可以比较方便地修改模型参数, 有利于系统分析和设计, 有利于光电集成电路的计算机辅助设计(CAD)。

Tucker 等人给出了半导体激光的大信号电路模型^[8, 9], 最近一些作者对之进行改进和开发^[10-13, 19], 本文则在 Tucker 模型的基础上, 把半导体激光速率方程中的相位方程写入模型, 建立了光放大器的电路模型。该模型包括了自发辐射噪声的影响。运用此模型对谐振光放大器的光功率输出特性与失谐关系特性进行了模拟分析。分析结果与已报道的理论和实验基本一致。虽然光放大器的时间平均自发辐射噪声已由 Tartwijk 等人^[6]给出, 但是没有分析噪声特性。为此本文用模型分析了光放大器的噪声特性, 并与先前的实验结果进行了对比。

* 河南省自然科学基金资助课题。

收稿日期: 1997-04-25; 收到修改稿日期: 1998-01-12

2 光放大器的电路模型

描述光放大器的速率方程为^[4-7]

$$dP_0/dt = [\Gamma \zeta (N - N_0) - 1/\tau_p] P_0 + 2\gamma E_{\text{ext}} (P_0)^{1/2} \cos(\varphi_{\text{ext}} - \varphi) \quad (1)$$

$$dP_{\text{sp}}/dt = [\Gamma \zeta (N - N_0) - 1/\tau_p] P_{\text{sp}} + C_{\text{sp}} N / \tau_N \quad (2)$$

$$d\varphi/dt = \Delta\omega + \alpha[\Gamma \zeta (N_0 - N)]/2 + \gamma E_{\text{ext}} / (P_0)^{1/2} \sin(\varphi_{\text{ext}} - \varphi) \quad (3)$$

$$dN/dt = I/e - N/\tau_N - \zeta (N - N_0) (P_0 + P_{\text{sp}}) \quad (4)$$

式中, P_0 、 φ 、 N 、 P_{sp} 分别为时间平均的光放大器信号所产生的输出光子数、输出光场相位、有源区载流子数、自发辐射噪声, ζ 为微分增益, Γ 为光限制因子, $1/\tau_p$ 为损耗速率, C_{sp} 为自发辐射比率, E_{ext} 为注入光的光场, φ_{ext} 为注入光相位, $\Delta\omega$ 为注入光与光放大器自由运转时的光频差, α 为线性展宽因子, N_0 为透明载流子数, τ_N 为载流子寿命, I 为光放大器泵浦电流, e 为电子电荷, γ 为取决于腔长的耦合系数

$$\gamma = (1/r - r) v_g / 2L \quad (5)$$

式中, v_g 为光的群速度, L 为腔长, r 为端面反射率。

(1)~(4) 式的理论是基于把总光场分成相干项[或者称作信号项即(1)式]和非相干项[或者称作自发辐射项即(2)式]^[4-6], 设自发辐射速率为 $10^{12}/\text{s}$ ^[6, 20], 在信号比特率为 10 Gb/s 时, 每个比特有 100 个自发辐射。即在信号比特率低于 10 Gb/s 时, (1)~(4) 式的时间平均有意义^[6]。

(1)、(2)、(4) 式两边乘以 e , (3) 式两边乘以 eP_n , 令 $P_0 = P_n P'_0$, $P_{\text{sp}} = P_n P'_{\text{sp}}$, P_n 是为了防止数值分析结果溢出而设的常数, 有

$$\Gamma I_{\text{st1}} + I_1 = C_{\text{ph}} dP_0/dt + P'_0/R_{\text{ph}} \quad (6)$$

$$\Gamma I_{\text{st2}} + C_{\text{sp}} I_r = C_{\text{ph}} dP'_{\text{sp}}/dt + P'_{\text{sp}}/R_{\text{ph}} \quad (7)$$

$$C_{\text{ph}} d\varphi/dt = I_2 + I_3 + I_4 \quad (8)$$

$$I = I_r + C_d dV_j/dt + I_{\text{st1}} + I_{\text{st2}} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \text{式 } C_{\text{ph}} &= eP_n, & R_{\text{ph}} &= \tau_p/eP_n, & I_{\text{st1}} &= e\zeta(N - N_0)P_nP'_0, \\ I_{\text{st2}} &= e\zeta(N - N_0)P_nP'_{\text{sp}}, & I_1 &= 2a_1E_{\text{ext}}(P'_0)^{1/2} \cos(\varphi_{\text{ext}} - \varphi), & a_1 &= e\gamma(P_n)^{1/2}, \end{aligned}$$

$$I_r = eN/\tau_N, \quad I_2 = -\alpha[\Gamma \zeta (N_0 - N)]/2, \quad I_3 = -\Delta\omega C_{\text{ph}},$$

$$I_4 = a_1E_{\text{ext}} \sin(\varphi_{\text{ext}} - \varphi)/(P'_0)^{1/2}, \quad C_d = eN_r[\exp(V_j/V_T)]/V_T$$

载流子与结电压的关系为^[11, 14]

$$N = N_r[\exp(V_j/V_T) - 1] \quad (10)$$

式中, N_r 为平衡态少数载流子数, V_j 为加在光放大器上的偏置电压, $V_T = \eta kT/e$, η 一般取 2, k 为波尔兹曼常数, T 为绝对温度。光功率与光子数的关系为^[6]

$$P_W = h\nu_g \alpha_m P_0 / 2 \quad (11)$$

式中, $h\nu$ 为光子能量, α_m 为端面损耗。由(6)~(9) 式建立光放大器电路模型如图 1 所示, 图中 P'_0 、 $i\omega$ 、 φ 分别代表光放大器信号所产生的输出光强度、频率和相位。从模型的推导过程来看, 该模型适用于法布里-珀罗(即谐振)、行波和注入锁定放大器, 由于 P'_{sp} (或者 P_{sp}) 可以理解为半导体激光器所有模的自发辐射水平^[4-6, 15, 16], 所以该模型可以描述自发辐射噪声的稳态分量和信号与自发辐射的拍噪声, 不能描述散粒噪声和自发辐射之间的拍噪声。图中可以看出, 仅用四个元件构成 P'_{sp} 噪声回路要比文献[12] 描述噪声的方法简便, 而且该模型可以描述动态噪声。

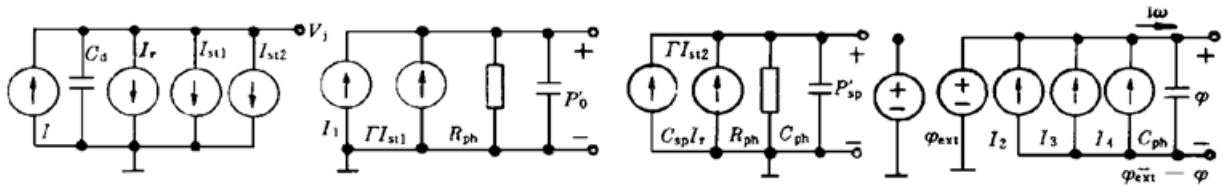


Fig. 1 Circuit model of a semiconductor laser amplifier

3 模拟结果

用 SPICE 或者 SABER 模拟, 先验证模型的正确性, 半导体激光器采用文献[6]中的谐振光放大器参数, 在模拟中不变的模型参数如下:

active cavity volume:	$V = 1 \times 10^{-16} \text{ m}^3,$
confinement factor:	$\Gamma = 0.45,$
group refractive index:	$n_g = 3.4,$
facet loss:	$\alpha_m = 1.1 \times 10^4 \text{ m}^{-1}$
carrier lifetime:	$\tau_N = 0.95 \times 10^{-9} \text{ s},$
transparent carrier number:	$N_0 = 1.41 \times 10^8,$
gain coefficient:	$\zeta = 2.2 \times 10^4 \text{ s}^{-1},$
linewidth enhancement factor:	$\alpha = 3.5,$
spontaneous emission ration:	$C_{sp} = 5 \times 10^{-5},$
saturation current ^[13] :	$I_s = 3 \times 10^{-10} \text{ A},$
	$P_n = 10^9, C_{ph} = 1.6 \times 10^{-10} \text{ F}, R_{ph} = 0.0044\Omega,$
	$a_1 = 0.0011, N_0' = e\mathcal{P}_n N_0 = 351, N_r = I_s \tau_N / e = 1.8.$

光输出与频率失谐关系曲线如图 2 所示。泵浦电流 $I = 0.995I_{th}$, I_{th} 为阈值电流, 输入光功率 E_{ext}^2 为 -30 dBm , 图中 $df = \Delta\omega/2\pi \text{ (GHz)}$ 为频率失谐, 与文献[6]中图 4 相比, 得到与理论和实验数据基本一致的曲线。

再对噪声进行分析, 由文献[17, 18]的实验结果, 光放大器的噪声中, 拍噪声功率远大于散粒噪声功率, 当输入信号功率小于 -40 dBm 时, 在半导体激光器内产生的主要是自发辐射之间的拍噪声, 当输入信号功率大于 -40 dBm 时, 则主要是信号和自发辐射之间的拍噪声, 而自发辐射之间的拍噪声可以由接收机的带宽限制。所以噪声分析应主要考虑信号和自发辐射之间的拍噪声, 并且信号的影响也应考虑进去, 即注入光不应只有直流分量。为此用一个直流分量和交流分量幅度都为 V_1 的正弦信号作为光注入的 E_{ext} 来考察噪声比较合理, 因为这种信号类似于升余弦脉冲, 在电路分析软件中又很容易产生, 为了与文献[17, 18]比较, 定义单位频率产生的噪声功率为相对强度噪声

$$\text{RIN} = 10 \log \sigma_{psp}^2 = \text{dB}[\text{RMS}(\sigma_{psp})] \quad (12)$$

式中, σ_{psp} 为 P_{sp} 的起伏即拍噪声, $\text{RMS}(x)$ 表示取 x 的均方根值, $\text{dB}(x) = 10 \log(x^2)$ 。

图 3 给出放大器增益为 20 dB , $I = 0.9995I_{th}$ 时相对强度噪声的功率谱, E_{ext} 的波形如上所述包括交流、直流分量, 改变光注入功率使光输出平均功率分别为 -10 dBm 、 -5 dBm 、 0 dBm , 其他参数同图 2。图中可见光输出增加 RIN 增加, 这与文献[17]图 4、7 和文献[18]图 12 的变化趋势是一致的, 但是图中噪声功率高出[17, 18]的水平, 高出的原因是[17, 18]用的注入光半导体激光器为直流偏置, 本模拟用的注入光是动态变化的, 这势必增加信号和

自发辐射之间的拍噪声。另外模拟用的半导体激光器参数与[17, 18]不同也是一个原因。

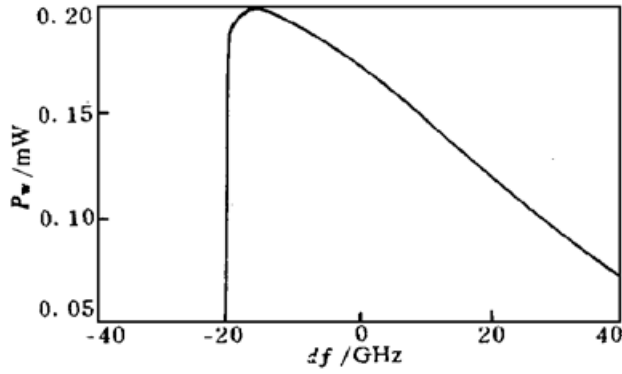


Fig. 2 Light output versus frequency detuning curve and comparison with reference [6]

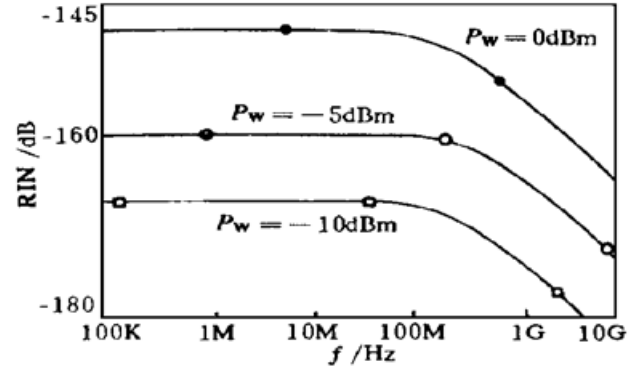


Fig. 3 RIN power spectra, light output as parametric variables

图 4 给出泵浦电流 I 分别为 0.9825 、 0.9875 、 \dots 、 $0.9975I_{th}$ 时的相对强度噪声。输入光功率 E_{in}^2 的直流分量为 -30 dBm, 交流分量为 -30 dBm, $df = -18$ GHz, 其他参数选取如图 2, 由图 4 可见当 I 增加 RIN 也增加, 这种趋势与[17]的结果是一致的。

图 5 给出参变量为 df 时的相对强度噪声, $I = 0.995I_{th}$, 其他参数选取如图 2, 由图 5 可见 df 从 -20 GHz 到 10 GHz, RIN 下降, 之后从 10 GHz 到 20 GHz, RIN 略有上升, 与图 2 所显示的光功率随频率失谐的规律比较说明噪声最小并非在增益最大处, df 在实际应用中应按需要来考虑, 即最大增益与最小噪声所要求的 df 是不同的。

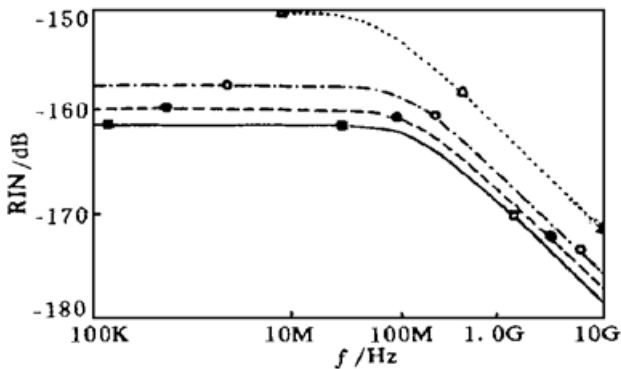


Fig. 4 RIN power spectra, pumping current as parametric variables. —, —, - · -, ··· stand for $I = 0.9825, 0.9875, 0.9925, 0.9975 (I_{th})$ respectively

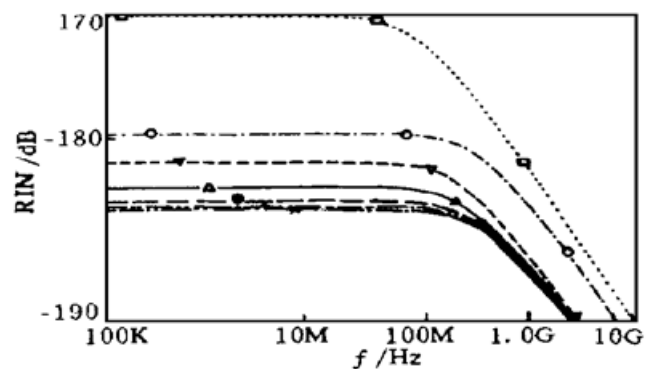


Fig. 5 RIN power spectra, frequency detuning as parametric variables. ···, —, —, - · -, ··· stand for $df = 20, 15, 0, -15, -20$ (GHz) respectively

结 论 本文给出了半导体激光放大器的电路模型, 在对比了模型的分析结果和已报道的理论和实验后, 对谐振光放大器的噪声进行了分析。结果显示当注入光为动态时, 半导体激光放大器噪声大于静态时的噪声, 注入光和输出光平均功率增加时噪声功率增加。噪声最小与增益最大所对应的频率失谐差别较大。这里的模型和分析结果对光放大器光电集成电路的计算机辅助设计有实际意义。

参 考 文 献

[1] M. Fujiwara, H. Nishimoto, T. Kajitani *et al.*, Studies on semiconductor optical amplifiers for line capacity expansion in photonic space-division switching system. *J. Lightwave Technology.*, 1991, 9(2)

- : 155~ 159
- [2] K. Weich, E. Patzak, Fast optical switching using two-section injection locked semiconductor lasers. *Electron. Lett.*, 1994, **30**(6) : 493~ 494
- [3] Li Lin, A unified description of semiconductor laser with external light injection and its application to optical bistability. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1994, **QE-30**(8) : 1723~ 1731
- [4] Roy Lang, Injection locking properties of a semiconductor laser. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1982, **QE-18**(6) : 976~ 983
- [5] F. S. Choa, T. L. Koch, Static and dynamical characteristics of narrow-band tunable resonant amplifiers as active filters and receivers. *J. Lightwave Technology*, 1991, **9**(1) : 73~ 83
- [6] G. H. M. van Tartwijk, H. de Waardt, B. H. Verbeek *et al.*, Resonant optical amplification in a laser diode: Theory and experiment. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1994, **QE-30**(8) : 1763~ 1768
- [7] 李林林, IL 光放大器的噪声. 中国激光, 1988, **15**(2) : 117~ 119
- [8] R. S. Tucker, I. Kaminow, High-frequency characteristics of directly modulated InGaAs ridge waveguide and buried heterostructure laser. *J. Lightwave Technology*, 1984, **2**(4) : 385~ 393
- [9] W. I. Way, Laser signal nonlinear distortion prediction for a single mode laser diode under microwave intensity modulation. *IEEE J. Lightwave Technology.*, 1987, **5**(3) : 305~ 315
- [10] 陈维友, 刘式墉, 激光二极管动态调制分析模型及其应用. 半导体学报, 1991, **12**(7) : 416~ 422
- [11] 陈维友, 刘式墉, 多模半导体激光器电路模型. 电子学报, 1996, **24**(2) : 11~ 16
- [12] 任新根, 徐国萍, 董天临, 半导体激光器噪声特性的电路模拟. 半导体学报, 1994, **15**(5) : 346~ 353
- [13] 任新根, 徐国萍, 董天临, 半导体激光器大信号等效电路模型的参数提取. 电子学报, 1994, **22**(2) : 27~ 33
- [14] R. S. Turcker, D. J. Pope, Microwave circuit models of semiconductor injection lasers. *IEEE MTT*, 1983, **31**(3) : 289~ 294
- [15] L. Li, Static and dynamic properties of injection-locked semiconductor lasers. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1994, **QE-30**(8) : 1701~ 1708
- [16] L. Li, V. C. Mendis, M. K. Maldar, Optical bistability and optical switching in semiconductor lasers. *J. Opt. Commun.*, 1996, **16**(5) : 162~ 168
- [17] T. Mukai, Y. Yamamoto, Noise in an AlGaAs semiconductor laser amplifier. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1982, **QE-18**(4) : 564~ 575
- [18] T. Saitoh, T. Mukaaki, 1.5 mm GaInAsP traveling-wave semiconductor laser amplifier. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1987, **QE-23**(6) : 1010~ 1020
- [19] 毛陆虹, 粘 华, 李林林, 注入锁定半导体激光器的电路模型及其调制特性分析. 通信学报, 1997, **18**(10) : 86~ 90
- [20] N. Schunk, K. Petermann, Noise analysis of injection-locked semiconductor injection lasers. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1986, **QE-22**(5) : 642~ 649

Circuit Model of a Semiconductor Laser Amplifier and Its Noise Characteristics Analysis

Mao Luhong^{1), 2)} Hu Guoju²⁾ Nian Hua¹⁾

1), *Electronic Engineering Department, Zhengzhou University, Zhengzhou 450052*
2), *Henan Fundamental and Applied Science Research Institute, Zhengzhou 450052*

(Received 25 April 1997; revised 12 January 1998)

Abstract A circuit model of a semiconductor laser (LD) amplifier is presented. The model enables the analysis of the characteristics of a LD amplifier using general circuit analysis software. The optical output characteristics of a detuned resonant type amplifier are analyzed by the model. Results are in agreement with reported theoretical and experimental data. The noise characteristics of a resonant type amplifier are also analyzed.

Key words semiconductor laser amplifier, circuit model, noise.