

单模半导体激光器噪声特性预测¹

高建军 高葆新 梁春广*

(清华大学微波与数字通信国家重点实验室 北京 100084)

* (河北半导体研究所 石家庄 050051)

摘要 本文在 Harder 小信号半导体激光器噪声等效电路模型的基础上, 与直接求解单模速率方程相结合, 给出了一个等效噪声网络模型, 并且利用该模型对 LD 的噪声特性进行了预测。

关键词 半导体激光器, 速率方程, 噪声网络模型

中图分类号 TN248.4

1 引言

随着集成光电子学的不断发展, 光集成电路计算机辅助设计成为推动 OEIC 发展的重要手段。开展 OEIC CAD 的前提是建立能充分反应光电子器件性能的可用线性电路元件等效的器件模型。LD 是 OEIC 中的重要器件, 对其等效电路模型开展研究将对 OEIC CAD 提供帮助。LD 等效电路模型的研究报道很多, 有代表性的如 J. Katz 的包括自发发射和自脉动效应的本征小信号等效电路模型^[1]; R. S. Tucker 的用于激光器动态调制模拟分析的大信号等效电路模型和微波小信号等效电路模型^[2,3]。而对激光器噪声等效电路模型的研究很少, Harder 的小信号噪声等效电路模型是对激光器噪声分析的基础^[4], 但是不足之处亦很明显, 例如, Harder 模型的电路元件中的电阻(无噪声)和相关噪声源均无法在通用电路模拟程序 SPICE 中实现, 所以一般仅在计算中使用。

我们开发的 TMS(Tsinghua Microwave SPICE) 软件与 SPICE 3E2 相比有了很大的改进。它增加了处理网络参数的能力, 可以接受由 S 、 Y 和 Z 等参数表征的网络模型。网络模型的端口可以达到九个, 并且能够对其进行时域分析。这给我们进行半导体激光器噪声网络模型的研究提供了方便。

本文在 Harder 噪声模型的基础上, 与直接求解单模速率方程相结合, 推导出一个二端口等效噪声网络模型。它由激光器微波小信号等效电路模型构成的线性二端口无噪声网络和三个独立的噪声源组成。该网络模型将 Harder 噪声模型的相关噪声源等效为三个独立的噪声源, 独立噪声源由电阻的热噪声替代, 这样得到一个可以在 TMS 软件中实现的 LD 噪声网络模型。利用该模型可以分析激光器的噪声特性、小信号频率响应特性等等。

2 激光器噪声等效电路模型研究

为了计算 LD 结电压噪声谱和相对噪声谱密度, 利用引入 Langevin 噪声源的单模速率方程:

$$dN/dt = I_A/\alpha - N/\tau_n - g_0(N - N_{om})(1 - \xi S)S + f_N(t), \quad (1)$$

$$dS/dt = \Gamma g_0(N - N_{om})(1 - \xi S)S - S/\tau_n + \Gamma \beta N/\tau_n + f_s(t), \quad (2)$$

¹ 1996-11-22 收到, 1997-11-17 定稿

式中 N 为载流子密度, N_{om} 为透明载流子密度, I_A 为有源区注入电流, α 为电子电荷和有源区体积的乘积, S 为有源区光子密度, Γ 为限制因子, g_0 为微分增益系数, τ_n 为载流子自发复合寿命, τ_p 为光子寿命, β 为光激射模式下的自发辐射系数, ξ 为增益压缩因子. $f_N(t)$ 和 $f_s(t)$ 是 Langevin 散粒噪声源, 它代表载流子浓度和光子密度的平均值的随机起伏, 在稳态下二者的平均值均为零. Langevin 噪声源和其交叉谱密度由散粒噪声均方值表达式给出^[4]:

$$\left. \begin{aligned} \langle F_N^2(\omega) \rangle &= I_0/q + 2S_0g_0N_{om}\alpha/q, \\ \langle F_s^2(\omega) \rangle &= \frac{2S_0\alpha}{\Gamma q} \left(\frac{1}{\tau_p} + \Gamma g_0N_{om} \right), \\ \langle F_s(\omega)F_N^*(\omega) \rangle &= -\frac{S_0\alpha}{\Gamma q} \left(\frac{1}{\tau_p} + 2\Gamma g_0N_{om} \right), \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中 S_0 和 N_0 分别是稳态条件下的载流子浓度和光子密度, I_0 为直流偏置注入有源区电流. 利用稳态条件下微扰分析得到的线性速率方程的傅里叶变换, 可以得到如图 1 所示的线性噪声等效电路模型. 其中电路中所有元件 (包括相关噪声源) 均为受注入偏置电流控制的线性元件, 电路元件数值表达式为^[3,5]

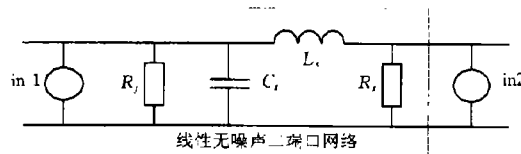


图 1 LD 相关噪声源等效电路模型

$$\left. \begin{aligned} i_s &= \alpha G_0(1 - 2\xi S_0)S \approx \alpha G_0S, \\ R_j &= R_d[1 + g_0\tau_n S_0(1 - \xi S_0)]^{-1} \approx R_d/(1 + g_0\tau_n S_0), \\ R_d &= m\tau_n KT/(q\alpha N) \approx mKT/(qI_{th}), \\ C_t &= C_{sc} + C_d, \quad C_d = \tau_n/R_d, \\ L_s &= \frac{R_d}{G_0(1 - 2\xi S_0)[\beta + g_0\tau_n S_0(1 - \xi S_0)]} \approx \frac{R_d\tau_p}{g_0\tau_n S_0}, \\ R_s &= \xi R_d/g_0\tau_n + \xi G_0 S_0 L_s \approx \beta \Gamma R_d \tau_p I_{th}/(\alpha g_0 \tau_n S_0^2), \\ I_{th} &\approx \alpha(1/\tau_p \Gamma g_0 + N_{om})/\tau_n, \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

其中 C_{sc} 为异质结电容, G_0 为稳态时的光增益, 表达式为 $G_0 = g_0(N_0 - N_{om})$ 。

欲想得到等效电路模型中的各个元件参数值, 必须求解稳态条件下的光子和载流子浓度, 将 (6) 式带入 (3) 和 (4) 式, 消去 S_0 得到下列方程:

$$\begin{aligned} &N_0^2(1 - \beta)(1 + \xi/g_0\tau_0) \\ &\quad - N_0[1/\Gamma\tau_p g_0 + I_A\tau_n/\alpha + (1 - \beta)N_{om} + (2 - \beta)\xi I_A/(g_0\alpha)] \\ &\quad + [1/(\Gamma\tau_p g_0) + N_{om} + \xi I_0/(g_0\alpha)]I_A\tau_n/\alpha = 0. \end{aligned} \quad (5)$$

求解方程得到两个解中较小的一个即为载流子浓度的稳态解, 其中國值以上载流子浓度的稳态解为

$$N_0 = N_{om} + 1/(\Gamma\tau_p g_0) + \xi I_0/(g_0\alpha). \quad (6)$$

同时得到光子浓度的稳态解, 表达式为

$$S_0 = [I_0/\alpha - (N_0/\tau_n)(1 - \beta)]\tau_p\Gamma \approx (\alpha/\tau_n)[1/(\tau_p\Gamma g_0) + N_{om}]. \quad (7)$$

相关噪声电流源表达式为

$$\begin{aligned} \langle i_{n1}^2 \rangle / \Delta f &= 2C_t^2 [mqV_t/(\alpha N_0)]^2 \langle F_N^2(\omega) \rangle = 2qI_0 + 4qg_0 N_{om} S_0 \alpha, \\ \langle i_{n2}^2 \rangle / \Delta f &= 2(L_s/R_s)^2 [\alpha G_0]^2 \langle F_S^2(\omega) \rangle = 4 \frac{(mV_T)^2 [1/(\Gamma\tau_p) + g_0 N_{om}] q S_0}{[N_0(g_0 S_0 + \beta/\tau_n) R_s]^2 \alpha}. \end{aligned} \quad (8)$$

两个噪声电源的相关部分均方值为

$$\langle i_{n1} i_{n2}^* \rangle / \Delta f = \frac{2mV_T q [1/(\Gamma\tau_p) + 2g_0 N_0]}{[N_0(g_0 S_0 + \beta/\tau_n) R_s]} S_0. \quad (9)$$

由(3)~(9)式可以推导出端口电噪声(TEN)和相对强度噪声(RIN)的表达式:

$$\text{TEN} = \frac{\langle i_{n1}^2 \rangle [R_s^2 + (\omega L_s)^2] + \langle i_{n2}^2 \rangle R_s^2 + 2 \langle i_{n1} i_{n2}^* \rangle R_s}{(L_s C_t q G_0)^2 D D^*}, \quad (10)$$

$$\text{RIN} = \frac{\langle i_{n1}^2 \rangle + \langle i_{n2}^2 \rangle R_s^2 [1/R_d^2 + (\omega C_t)^2] - 2 \langle i_{n1} i_{n2}^* \rangle R_s/R_j}{(L_s C_t q G_0 S_0)^2 D D^*}, \quad (11)$$

其中 $D = \left[\frac{1}{L_s C_t} \left(1 + \frac{R_s}{R_j} \right) - \omega^2 \right] + j\omega \left(\frac{R_s}{L_s} + \frac{1}{R_j C_t} \right)$.

以上噪声分析基于微波频率调制。在频率较低的情况下, $1/f$ 噪声将占据主要地位^[5]。半导体激光器有源区中 $1/f$ 噪声来源有以下三部分: (1) 载流子扩散。(2) 吸收系数的起伏。(3) 光子数目的起伏。在低频区考虑到 $\omega L_s \ll R_s$, $1/\omega C_d \gg R_d$, $F_{N,1/f} \gg F_N$, $F_{S,1/f} \gg F_S$, LD 阻抗表达式简化为

$$Z(\omega) = mKT/qI_0. \quad (12)$$

由载流子扩散引起的 $1/f$ 噪声等效输入电流表达式为

$$\langle i_{1/f}^2 \rangle = [\gamma q I_0 / (\tau_n f)] \Delta f, \quad (13)$$

其中 γ 为 Hooge 系数, f 为频率。

得到的端口电噪声(TEN)电压表达式为

$$\langle V_{1/f}^2 \rangle = |Z(\omega)|^2 \langle i_{1/f}^2 \rangle. \quad (14)$$

3 激光器噪声网络模型研究

值得注意的是由于在通用电路模拟器中(如 SPICE)电阻隐含有热噪声, 其线性无噪声二端口网络的实现存在困难, 而且相关噪声源亦在一般电路模拟器中无法实现。因此欲想在

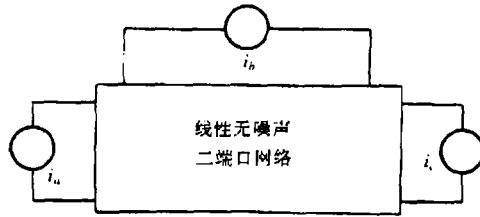


图 2 LD 独立噪声源等效电路模型

通用电路模拟器中进行激光器的噪声特性分析, 开展 LD 噪声网络模型研究是最佳途径之一, TMS 软件系统的实现为完成这一工作提供了方便。

对应图 1 所示的噪声二端口网络, 首先将其两个相关噪声源变换为独立的噪声源。假设该二端口网络含有三个独立的噪声源, 如图 2 所示为 $\langle i_a^2 \rangle$ 、 i_b^2 和 $\langle i_c^2 \rangle$, 则这些噪声电流源和图 1 中的相关噪声电流源的关系为

$$\begin{aligned} \langle i_a^2 \rangle &= \langle i_{n1}^2 \rangle + \langle i_{n1} i_{n2}^* \rangle, \\ \langle i_b^2 \rangle &= -\langle i_{n1} i_{n2}^* \rangle, \\ \langle i_c^2 \rangle &= \langle i_{n2}^2 \rangle + \langle i_{n1} i_{n2}^* \rangle. \end{aligned} \quad (15)$$

三个独立噪声源可以利用电阻产生的热噪声受控源的形式来实现, (电流谱密度为 $\langle i_R^2 \rangle = 4KT/R$)。值得注意得是由于 $\langle i_b^2 \rangle$ 为负噪声电流源, 因此在计算端口电噪声 (TEN) 和相对噪声强度 (RIN) 时, 应把独立噪声源 $\langle i_a^2 \rangle$ 和 $\langle i_c^2 \rangle$ 的贡献减去 $\langle i_b^2 \rangle$ 的贡献。

在 LD 噪声网络模型中, 线性二端口无噪声网络可以由 R_j 、 C_t 、 R_s 和 L_s 表征的 Y 参数来表示:

$$\left. \begin{aligned} Y_{11} &= 1/R_j + j\omega C_t + 1/j\omega L_s, \\ Y_{12} &= Y_{21} = -1/j\omega L_s, \\ Y_{22} &= 1/R_s + 1/j\omega L_s. \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

这样就可以解决在分析 LD 噪声时, 等效电路模型中等效电阻 R_s 引起的热噪声的影响。

端口电噪声 (TEN) 可以直接由 LD 的电路噪声模拟得到, 而相对强度噪声 (RIN) 由下式给出:

$$\text{RIN} = q^2 S_p(\omega) / (\alpha^2 S_0^2), \quad (17)$$

其中 $S_p(\omega)$ 为 LD 输出端口的噪声功率谱。

4 模拟结果和讨论

利用上述噪声网络模型对隐埋异质结单模半导体激光器的噪声特性进行模拟, 大信号模型参数取自文献 [6]。

图 3(a)、3(b) 分别给出了在注入有源区电流与阈值电流比率 $I_o/I_{th} = 1.0, 1.5, 2.0$ 时, 端口电噪声 TEN(单位 $\text{dB}(\text{V}^2/\text{Hz})$) 和相对强度噪声 RIN(单位 $\text{dB}(\text{V}^2/\text{Hz})$) 随频率变化曲线。其中实线表示网络模型模拟结果, 而圆圈表示利用公式 (10) 和 (11) 直接计算结果, 从图中可以看到数据吻合很好。

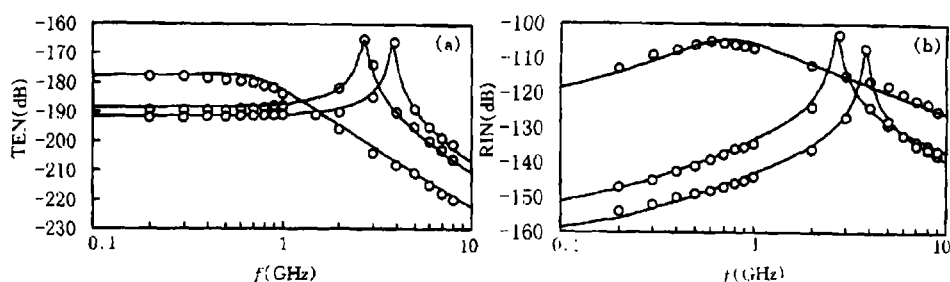


图 3 TENS 和 RIN 随频率变化曲线

从图 3 可以看到, 随着 LD 注入电流的增加, 张弛振荡频率逐渐增大 (在 $I_o/I_{th} = 1.0, 1.5, 2.0$ 时, 约分别为 0.7GHz, 2.7GHz, 3.9GHz)。在接近张弛振荡频率时, TENS 和 RIN 电压均达到峰值, 其波峰是由耦合光子-载流子系统的本征响应所引起的。

表 1 给出了 LD 电端口噪声 TENS 随注入电流变化的模拟数据和测量数据, 在模拟 LD 端口电噪声 TENS 时, 考虑了寄生网络效应, 因此得到的 TENS 数据包含了寄生电阻产生的热噪声。从表 1 中可以看到, 在稍微超过阈值电流 (17.5mA) 的电流 I_o (约 18mA) 时, 端口电噪声 TENS 达到峰值, 超过激射阈值时 TENS 数值的减小是由于信号 (激光) 功率迅速增加的缘故。

表 1 电端口噪声 TENS 随注入电流变化数据

I_o/I_{th}	模拟值 (dBm)	测量值 (dBm)
≤ 1.0	-176	-165
1.05	-168	-158
≥ 1.1	-174	-163

5 结 论

本文在 Harder 的小信号噪声等效电路模型的基础上, 与直接求解单模速率方程相结合, 利用改进的噪声等效电路模型给出了一个等效噪声网络模型, 它由激光器微波小信号等效电路模型构成的无噪声网络和三个独立的噪声源组成。该网络模型可以在 SPICE 的改进版 TMS 软件中实现, 利用该模型可以分析激光器的噪声、小信号频率响应等特性。

参 考 文 献

- [1] Katz J, Margalit S, Harder C, *et al.* The intrinsic electrical equivalent circuit of a laser diode. *IEEE J. of Quantum Electron.*, 1981, QE-17(1): 4-7.
- [2] Tucker R S, Kaminow I P. High-frequency characteristics of directly modulated InGaAsP ridge waveguide and buried heterostructure lasers. *J. Lightwave Technol.*, 1984, LT-2(5): 385-393.
- [3] Tucker R S, Pope D J. Microwave circuit model for semiconductor of injection laser modulation dynamics. *IEEE Trans. on MTT*, 1983, MTT-31(3): 289-294.
- [4] Harder C, Katz J, Margalit S. Noise equivalent circuit of a semiconductor laser diode. *IEEE J. of Quantum Electron.*, 1982, QE-18(3): 333-337.
- [5] Bernard Orsal, Signoret P, Peransin J-M, *et al.* Correlation between electrical and optical photocurrent noises in semiconductor laser diode. *IEEE Tran. on ED*, 1994, ED-41(11): 2151-2160.

- [6] Andrekson P A, Abdersson P, Alping A, *et al.* In situ characterization of laser diodes from wide band electrical noise measurements. *J. Lightwave Technol.*, 1986, LT-4(7): 804-811.

NOISE PERFORMANCE PREDICTION FOR SINGLE-MODE SEMICONDUCTOR LASER DIODE

Gao Jianjun Gao Baoxin Liang Chunguang*

(*Tsinghua University, State Key Lab. on Microwave & Digital Comm., Beijing 100084*)

**(Hebei Semiconductor Research Institute, Shijiazhuang 050051)*

Abstract A noise network model of single-mode semiconductor laser diode is established based on the Harder LD small signal noise model and straightforward calculation of rate equation in the TMS software. The characteristics of frequency response and noise are analyzed by using the presented model.

Key words Semiconductor laser, Rate equation, Noise network model

- 高建军: 男, 1968年生, 博士生, 主要研究方向为微波电路和高速光纤通信系统的计算机辅助设计。
高葆新: 男, 1934年生, 教授, 博士生导师, 中国电子学会会士, 微波学会副主任。多年从事微波集成电路的计算机辅助设计理论工作, 多次荣获国家和教委科技进步奖。
梁春广: 男, 1939年生, 电子工业部第十三研究所副所长, 教授, 博士生导师, 中国工程院院士。长期从事半导体器件的设计和研制工作, 多次荣获国家级和部省级科技进步奖。