

基于扣除法的半导体激光器高频响应仿真新方法^{*}

张尚剑¹ 刘超¹ 伞海生² 祝宁华¹

(1 中国科学院半导体研究所集成光电子学国家重点实验室, 北京 100083)

(2 兰州大学磁学与磁性材料教育部重点实验室, 兰州 730000)

摘要: 基于激光器速率方程和等效电路模型对激光器高频响应特性进行分析, 提出了一种采用激光器频率响应扣除法提取有源区本征响应和预测激光器整体频率响应的仿真新方法. 用该方法对实验样品的高频调制响应进行了仿真, 仿真结果与实际测量数据相吻合.

关键词: 光通信技术; 激光器; 调制响应; 扣除法

EEACC: 4320J; 2560B

中图分类号: TN365

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2005)06-1224-05

1 引言

直接调制半导体激光器是光通信和光互连中的关键器件, 其在光纤通信系统以及高速信息传输系统中都有重要应用. 激光器的动态特性决定整个通信系统的指标, 而小信号调制响应则是表征激光器动态特性的重要性能参数^[1]. 一般说来, 有两种方法研究激光器的小信号调制响应: 一种是直接将速率方程线性化进行小信号分析, 求解得到有源区调制响应, 这种方法由于忽略了封装和芯片内部的寄生参数, 不能用于激光器测试封装中的阻抗匹配分析优化设计^[2]; 另一种是基于速率方程建立激光器的等效电路模型, 用双端口微波电路来模拟激光器小信号行为, 由于表征有源区的电路元件较多且元件参数随偏置电流变化, 确定起来非常繁琐^[3].

本文基于频率响应扣除法, 将求解速率方程与等效电路两方法结合, 提出了一种新的提取激光器有源区响应和模拟整体调制特性的仿真方法. 该仿真方法通过激光器阻抗特性确定寄生网络参数, 无需估计有源区的电路元件参数, 非常简单. 文中给出了测试与仿真结果的对比以验证该仿真方法的正确

性.

2 速率方程与等效电路

描述光子密度 S 和载流子密度 N 相互作用的激光器速率方程是分析有源区调制响应, 即激光器本征响应的基本方程, 可表示为

$$\frac{dN}{dt} = \frac{I_A}{qV_a} - \frac{N}{\tau_n} - g_0 \frac{N - N_{0m}}{1 + S} S \quad (1)$$

$$\frac{dS}{dt} = \left[g_0 \frac{N - N_{0m}}{1 + S} - \frac{1}{\tau_p} \right] S + \frac{N}{\tau_n} \quad (2)$$

$$P = SV_a \frac{h}{2} \gamma_p \quad (3)$$

式中 γ_p , γ_n 分别是光场限制因子、增益压缩因子和自发辐射因子; g_0 是增益系数; τ_n 和 τ_p 分别表示载流子和光子的寿命; I_A 是注入有源区的总电流; P 是输出光功率. 将速率方程线性化做小信号分析, 可得有源区调制响应^[1,4]

$$H_A(f) = \frac{p(f)}{i_A(f)} \times \frac{i_A(0)}{p(0)} = \frac{f_r^2}{f_r^2 - f^2 + j \omega_d f / 2} \quad (4)$$

其中

$$f_r^2 = g_0 S_0 / 4 \tau_p \tau_n, \quad \omega_d = \frac{1}{\tau_n} + 4 \tau_p^2 f_r^2 \left(\frac{1}{g_0} + \gamma_p \right) \quad (5)$$

^{*} 国家高技术研究发展计划(批准号: 2004AA31G220), 国家重点基础研究发展计划(批准号: G2000036601) 和国家杰出青年基金(批准号: 69825109) 资助项目

张尚剑 男, 1979 年出生, 博士研究生, 目前从事高速光电子器件高频特性研究.

祝宁华 男, 1959 年出生, 研究员, 博士生导师, 目前从事高速光通信器件的封装测试研究.

2004-08-26 收到, 2004-12-01 定稿

式中 p 和 i_A 分别为 P 和 I_A 的小信号分量; f_r 表示张弛振荡频率; d 是衰减因子. (5) 式说明: 有源区调制响应可由张弛振荡频率和衰减因子两个参数近似表示.

引入 Shockley 异质结 $N-V_A$ 关系, 速率方程式变换成由五个等效电路元件表示的有源区电路模型^[1,2], 如图 1 所示. 图 1 中 C_d, L_x 分别表示有源区的载流子和光子的存储效应, R_l, R_x 用来模拟激光器的张弛振荡阻尼, C_{sc} 是空间电荷电容. 在高速 Al-GaAs 激光器中, 有源区的电阻一般小于 1Ω , 且偏置电流越大, 阻抗值越小, 因而, 有源区阻抗基本可看作零^[5,6]. 由于大多数激光器芯片在使用中都是

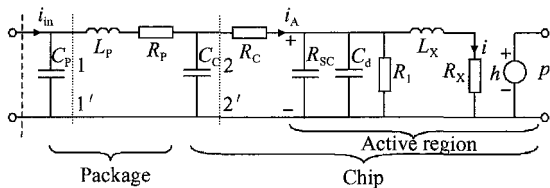


图 1 含寄生网络的激光器等效电路模型

Fig. 1 Typical circuit model of laser including parasitic network

置于热沉上, 因此整个激光器的等效电路还包括寄生网络. 图 1 中, C_p, L_p, R_p 代表封装 (Package) 寄生网络, C_c, R_c 代表芯片 (Chip) 寄生网络^[3,7], 激光器的光输出采用电流控制电压源等效. 可得激光器的调制响应

$$H_D(f) = \frac{p(f)}{i_{in}(f)} = H_P(f) H_A(f) \quad (6)$$

其中 i_{in} 为激光器小信号电流, 有源区调制响应 H_A 可由 (4) 式确定. H_P 表示寄生网络的响应, 且有

$$Z_1 = \frac{1}{Y_{in} - j2\pi f C_p}, \quad Z_2 = \frac{1 + j2\pi f Z_d C_p - Y_{in} Z_d}{Y_{in} + j2\pi f Z_d C_c Y_{in} - j2\pi f C_c - j2\pi f C_p + Z_d C_c C_p 4\pi^2 f^2} \quad (8)$$

式中 $Z_d = R_p + j2\pi f L_p$. 图 3 给出了不同偏置电流下寄生网络响应, 可以看出, 在 $0.5 \sim 12 \text{ GHz}$ 内不同偏置电流下的 H_P 差别很小 ($< 0.3 \text{ dB}$), 基本上可认为其不随偏置电流变化, 因而式 (6) 可以重写为

$$H_D(f, I_b) = H_P(f) H_A(f, I_b) \quad (9)$$

$$\left| \frac{H_D(f, I_{b1})}{H_D(f, I_{b0})} \right| = \frac{f_{r1}^2 \sqrt{(f^2 - f_{r0}^2)^2 + (d_0/2)^2 f^2}}{f_{r0}^2 \sqrt{(f^2 - f_{r1}^2)^2 + (d_1/2)^2 f^2}} \quad (10)$$

$$H_P(f) = \frac{i_A(f)}{i_{in}(f)} = \frac{1}{1 + j2\pi f C_c Z_2} \times \frac{1}{1 + j2\pi f C_p Z_1} \quad (7)$$

式中 Z_1, Z_2 分别是图 1 中 11、22 参考面向右看的等效阻抗. 从 (6), (7) 式可知激光器的整体调制响应由寄生响应和本征响应组成, 本征响应可由速率方程求解得到, 寄生响应由寄生网络决定.

3 寄生网络确定

图 2 给出了 F-P 型激光器 (阈值 9.4 mA) 样品在偏置电流 $30, 40, 50 \text{ mA}$ 的导纳值 Y_{in} , 其随偏置电流的变化很小. 由最小二乘法确定寄生网络电路参数值为: $C_p = 99.4 \text{ fF}, L_p = 0.22 \text{ nH}, R_p = 1 \Omega, C_c = 3.5 \text{ pF}, R_c = 4.98 \Omega$. 拟合时参照文献 [2] 报道的典型值和文献 [7] 给出的测量经验值; 鉴于偏置电流越高, 有源区各电路参数值越小, 有源区越接近短路, 因此选择偏置电流 50 mA 的阻抗值作为拟合目标.

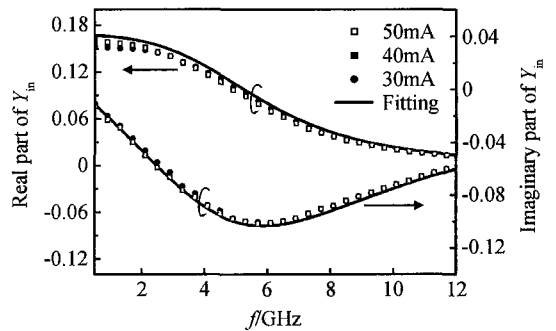


图 2 测量的激光器阻抗值及其计算结果

Fig. 2 Measured and calculated impedances of laser

将寄生网络参数值与激光器导纳值代入 (7) 式计算寄生网络的响应, 其中 Z_1, Z_2 由 Y_{in} 表示

式中 f_{r1}, f_{r0}, d_1, d_0 分别为偏置电流为 I_{b1} 和 I_{b0} 对应的张弛振荡频率和衰减因子. 从 (10) 式可知激光器整体频响与有源区频响之比可视作与偏置电流无关, 这样可从激光器的整体频率响应中获得有源区的响应, 这就是频率扣除法^[4]. 由于有源区无法直接进行电域高频测试, 通常需要热沉、金丝等夹具^[7], 这样在整体响应中势必引入了寄生响应. 应用扣除法可以从激光器整体频响去除寄生网络的影响, 还

可消除测试仪器、连接电缆等与偏置无关的外界因素的影响,使求得的有源区响应更准确. 其常被用于提取激光器本征响应,从而确定激光器速率方程参数. 如果综合考虑寄生响应和有源区响应,就可实现对特定偏置下的激光器整体响应进行预测仿真,这就是基于扣除法的激光器频率响应仿真方法.

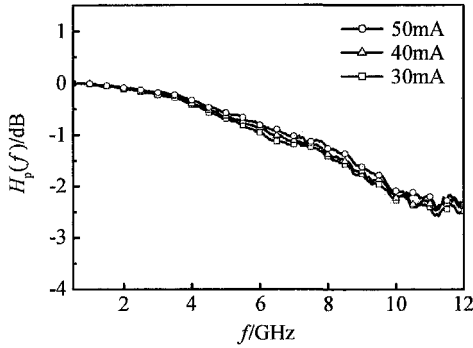


图 3 不同偏置下激光器寄生网络的频率响应

Fig. 3 Parasitic responses of laser at different bias currents

4 实验与仿真

为了验证扣除法预测和仿真激光器频率响应的正确性与有效性,我们选择 HP8720D 网络分析仪对激光器高频响应进行测试与比较. 实验中先用 HP85052D 标准对网络分析仪进行全双端口短路-开路-匹配-直通 (SOLT) 方法校准^[8,9], 然后用开路-短路-匹配负载 (OSL) 方法对微波探针 (Cascade ACP-DS probe) 进行校准^[10,11].

校准后对实验样品进行测试,得到偏置电流在 30, 40 和 50mA 下的高频调制响应,如图 4 所示,图中数据均归一化(图 7 同). 将测试数据进行扣除,如图 5 所示,按(10)式拟合得到对应电流下的 f_r 和 α . 从图 6 可以看出三种电流下的 f_r^2 和 α 数据呈现了较好的线性,用此线性关系可以预测其他电流下的张弛振荡频率和衰减因子,例如,图 6 中所标注的空心点分别对应偏置电流为 25, 35, 45mA 的张弛振荡频率和衰减因子,将这些参数代入(10)式得到对应偏置电流下激光器整体响应的仿真值. 为了验证仿真结果,对相应偏置电流下的频率响应也进行了测量,如图 7 所示,可以看出仿真与测量的结果吻合比较好,仿真结果很好地表征了激光器高频调制响应. 当然,由于(4)式在较低偏置电流时不是很

准确,使得在仿真较低偏置电流下的频率响应时,张弛振荡峰与测量结果存在一定的偏差,但总体而言在表征激光器带宽上该方法比较准确,这说明基于扣除法的仿真方法是可行的.

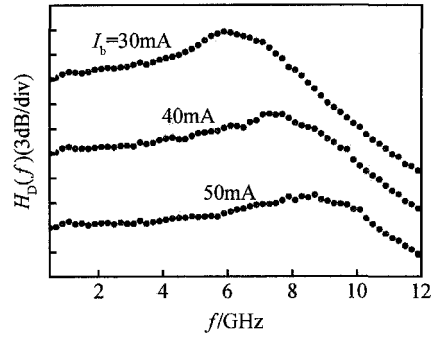


图 4 不同偏置电流下的激光器频率响应测量值

Fig. 4 Measured frequency responses of laser at different bias currents

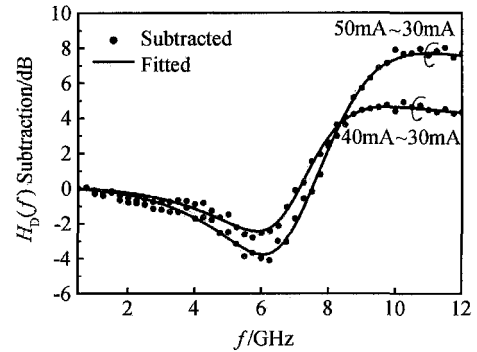


图 5 激光器频率响应扣除法求取 f_r 、 α

Fig. 5 Subtraction method for extracting f_r 、 α

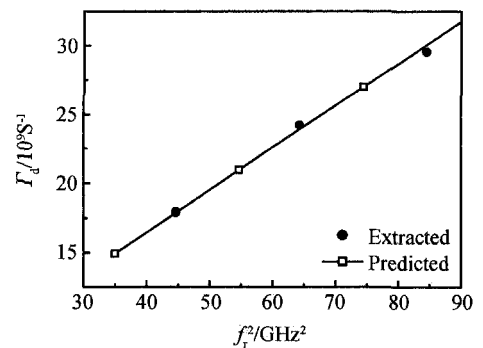


图 6 f_r^2 与 α 关系

Fig. 6 Damping factors versus resonance frequencies squared

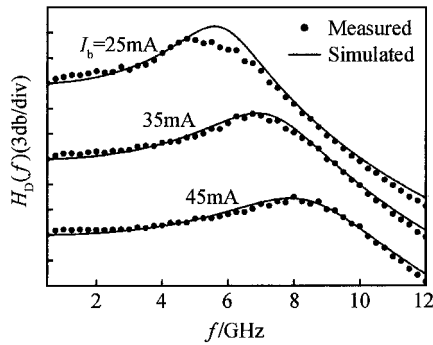


图 7 激光器频响测量值与仿真值比较

Fig. 7 Comparison between simulation and measurement

5 结论

本文将激光器速率方程与等效电路相结合分析激光器高频调制响应,提出了基于扣除法的激光器频率响应的仿真方法.该方法通过扣除法提取激光器有源区响应并通过激光器张弛振荡频率平方与衰减因子存在的线性关系来预测和模拟整体激光器频率响应.由于在仿真中考虑了寄生网络的响应,仿真结果与实验数据比较吻合.该仿真方法对于预测激光器带宽、优化激光器芯片参数和研究器件的封装设计有重要的参考价值.

参考文献

- [1] Tucker R S. High-speed modulation of semiconductor lasers. IEEE Journal of Lightwave Technology, 1985, LT-3(6) :1180
- [2] Tucker R S, Pope D J. Microwave circuit models of semiconductor injection lasers. IEEE Trans Microw Theory Technol, 1983, 31(3) :289
- [3] Majewski M L, Novak D. Method for characterization of intrinsic and extrinsic components of semiconductor laser diode circuit model. IEEE Microw Guided Wave Lett, 1991, 1(9) : 246
- [4] Morton P A, Tanbur-Ek T, Logan R A, et al. Frequency response subtraction for simple measurement of intrinsic laser dynamic properties. IEEE Photonics Technol Lett, 1992, 4(2) :133
- [5] Weisser S, Esquivias I, Tasker P J, et al. Impedance characteristics of quantum well lasers. IEEE Photonics Technol Lett, 1994, 6(12) :1421
- [6] Gao J J, Gao B X, Liang G C. The direct extraction of the model parameters for the high-speed low-threshold semiconductor laser. APMC 97, 1997 :569
- [7] Zhu N H, Liu Y, Pun E Y B, et al. Scattering-parameter measurements of laser diodes. Optical and Quantum Electronics, 2002, 34(8) :747
- [8] Dibia P, Martens L. Correction technique for on-chip modulation response measurements of optoelectronic devices. IEEE Trans Microw Theory Technol, 1995, 43(6) :1264
- [9] Chen Z Y, Wang Y L, Zhu N H. Two-port calibration of the test fixtures with different test ports. Microwave Opt Technol Lett, 2002, 35(4) :299
- [10] Wang Youlin, Liu Yu, Sun Jianwei, et al. Reflection coefficient and small-signal response measurement of electroabsorption modulated DFB laser. Chinese Journal of Semiconductors, 2003, 24(9) :955 (in Chinese) [王幼林, 刘宇, 孙建伟, 等. 电吸收调制器和 DFB 激光器集成器件的测量. 半导体学报, 2003, 24(9) :955]
- [11] Xu Yao, Wang Wei, Wang Ziyu. Measurement of 3dB bandwidth of laser diode chips. Chinese Journal of Semiconductors, 2003, 24(8) :794

A New Method Based on Subtraction for Simulating a High Frequency Modulation Response of a Semiconductor Laser *

Zhang Shangjian¹, Liu Chao¹, San Haisheng², and Zhu Ninghua¹

(1 *State Key Laboratory on Integrated Optoelectronics, Institute of Semiconductors,
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China*)

(2 *Key Laboratory for Magnetism and Magnetic Material of Ministry of Education,
Lanzhou University, Lanzhou 730000, China*)

Abstract: A new simulation method is proposed. The method is based on analysis of the high frequency modulation response of a laser by utilizing rate equations and an equivalent circuit model. It uses subtraction to extract the intrinsic response and to estimate the frequency response of the laser during simulation. The simulation results show good agreement with measurements.

Key words: optical communication technology; laser diode; modulation response; subtraction method

EEACC: 4320J; 2560B

Article ID: 0253-4177(2005)06-1224-05

* Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China (No. 2004AA31g220), the State Key Development Program for Basic Research of China (No. G2000036601), and the National Science Fund for Distinguished Young Scholars (No. 69825109)

Zhang Shangjian male, was born in 1979, PhD candidate. His current research interest is in characterization of high speed optoelectronic devices.

Zhu Ninghua male, was born in 1959, professor, advisor of PhD candidates. His current research interest is in packaging and measurement of high speed devices for optical communication.

Received 26 August 2004, revised manuscript received 1 December 2004

©2005 Chinese Institute of Electronics