

封装寄生参量对半导体激光器频率响应的模拟分析

肖勇 陈福深

(电子科技大学宽带光纤传输与通信网技术教育部重点实验室, 四川 成都 611731)

摘要 半导体激光器是光通信中的核心器件之一, 广泛应用于城域间的骨干网。光电集成电路计算机辅助设计是对光电器件建模仿真的重要方法, 在光通信中起着举足轻重的作用。推导了激光器小信号频率响应的计算公式, 研究了激光器的封装寄生参量的谐振现象, 利用这种谐振效应对激光器的频率响应特性进行有效补偿, 采用数据用电路仿真软件 PSpice 对建立的等效电路模型进行小信号频率响应分析得出 3 dB 频率响应带宽。

关键词 半导体激光器; 寄生参量; 频率响应; 特性分析

中图分类号 TN248.4

OCIS 140.3460 140.5960 140.3510

文献标识码 A

Simulation and Analysis of Package Parasitic Parameters on Frequency Response Characteristics of Semiconductor Laser

Xiao Yong Chen Fushen

(Key Laboratory of Broadband Optical Fiber Transmission and Communication Networks, Ministry of Education, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 611731, China)

Abstract Laser diode is one of the core devices in optical communications, and is widely used in communication backbone network between metropolitans. Optoelectronic integrated circuit computer-aided design is an important method for optoelectronic device modeling, and plays an important role in optical communication. The small signal frequency response formula of laser diode is deduced, and the resonance phenomenon of package parasitic parameters is studied, and such a resonance effect is used on the compensation of the chip's frequency response characteristics. Finally circuit simulation software PSpice is used to analyze the circuit model for small signal frequency response, and the frequency response bandwidth of 3 dB is obtained.

Key words semiconductor laser; parasitic parameters; frequency response; characteristics analysis

1 引言

半导体激光器是现代光纤通信系统中的关键器件之一, 调制性能卓越的激光光源是光纤通信速度不断提升的前提, 对半导体激光器的动态特性进行分析是研究激光器调制性能的重要方法。一般讨论半导体激光器的动态特性是采用速率方程的小信号分析^[1,2]。然而这种分析方法有其局限性: 1) 不能处理由激光器封装产生的寄生参量和芯片接触产生的寄生参数的影响。在高速光纤通信系统中, 这些寄生参数对激光器的频率响应带宽有重要的影响; 2) 在设计半导体激光器匹配电路时, 必须研究半导体激光器的高频阻抗特性, 速率方程理论就无能为力了。为了解决上述问题, 我们有必要对激光器封装寄生参量进行分析讨论。

2 含寄生参量的等效电路模型

半导体激光器的大信号等效电路模型首先由 Tucker 等^[3,4]提出。该模型中, 关键部分是有源区的等效

收稿日期: 2010-06-17; 收到修改稿日期: 2010-08-12

作者简介: 肖勇(1986—), 男, 硕士研究生, 主要从事光纤通信系统、光网络、高速光电子器件建模等方面的研究。

E-mail: xyong1986@163.com

导师简介: 陈福深(1945—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事集成光学与光电子技术等方面的研究。

E-mail: fschen@uestc.edu.cn

电路,可以从速率方程和异质结的载流子与结电压之间的关系导出。经过发展,在速率方程中加入相位方程和接触参量以及封装寄生参量^[5,6]可以得到半导体激光器完整的大信号等效电路模型。半导体激光器在小信号调制的情况下,对激光器大信号等效电路模型进行线性化,可以得到半导体激光器小信号等效电路模型,如图1所示。

半导体激光器的封装寄生参量来源于封装和测试中的载体和金丝。芯片的焊盘与载体接触时将引入并联寄生电容 C_p ,该电容将对光电流分流导致信号幅度下降。

同时金丝是连接激光器芯片与外部电路的桥梁呈现感性和本身的金属欧姆特性,因此会有串联电感 L_p 和串联电阻 R_p 的存在。另一方面激光器芯片焊接在载体的电极上与电极接触,因此接触处同样存在并联电容 C_s ;同时由于金属本身的欧姆特性表现出电阻效应,所以存在串联电阻 R_s ,如图1所示。图1所示的半导体激光器小信号等效电路模型中 C_{sc} 是激光器有源区空间电荷电容; C_d, L 分别为结扩散电容和串联电感,表示有源区内载流子和光子的存贮效应; R_a, R_b 则是用来模拟半导体激光器的张弛振荡阻尼。

根据等效电路模型,可以得出半导体激光器的频率响应特性计算公式:

$$T(\omega) = \frac{H(\omega)}{H(0)} \cdot \frac{F(\omega)}{F(0)}, \quad (1)$$

式中 $H(\omega), F(\omega)$ 分别是寄生部分的频率响应和本征部分的频率响应, $H(0), F(0)$ 分别是直流情况下寄生部分的传递函数和本征部分的传递函数。

$$H(\omega) = \frac{1}{(1 + j\omega R_s C_s) \{1 + j\omega C_p [j\omega L_p + R_s / (1 + j\omega R_s C_s)]\}^2 \{j\omega L_c + [j\omega L_p + R_s / (1 + j\omega R_s C_s)]\}}, \quad (2)$$

$$F(\omega) = \frac{R_a}{R_a + R_b - \omega^2 L R_a (C_{sc} + C_d) + j\omega [L + R_a R_b (C_{sc} + C_d)]}. \quad (3)$$

利用(1)式对半导体激光器的频率响应特性进行数值计算,并讨论寄生参量对频率响应特性的影响,计算中所用的主要参数列在表1^[7,8]中。

表1 计算参数

Table 1 Parameters of calculation

Parameters /unit	τ_{ph}/ps	τ_n/ns	$\alpha/(A \cdot m^3 \cdot s)$	β_{sp}	$g_0/(m^3/s)$	n_0/m^{-3}
Value	6.0	3.1	4.6×10^{36}	1.0×10^{-3}	1.4×10^{-12}	1.5×10^{24}
Parameters /unit	C_{sc}/pF	C_d/pF	R_a/Ω	$R_b/m\Omega$	L/pH	Γ
Value	10.0	28.6	1.5	20	8.5	0.3

3 封装寄生参量对频率响应的影响

封装寄生参量有 R_p, L_p, C_p ,把表1中参数代入频率响应函数中,在 PSpice 中建立仿真模块,然后进行分析得到的结果如下所示。

由于连接激光器芯片与外部电路的金丝呈现金属欧姆特性,因此存在串联引线电阻 R_p 。从 $1 \sim 20 \Omega$ 改变引线电阻 R_p 的值,如图2所示。引线电阻影响寄生振荡的频率响应的带宽和幅度,在 3 GHz 以下频率响应曲线比较平坦,超过 3 GHz 之后曲线出现谐振峰。 R_p 在较小值(1Ω 和 5Ω)的情况下 3 dB 频率响应带宽分别是 11.4 GHz 和 12.2 GHz ,在较高值(15Ω 和 20Ω)时 3 dB 频率响应带宽分别是 13.5 GHz 和 13.1 GHz ,且频率响应幅度减小,而只有 10Ω 时 3 dB 频率响应带宽达到 14.3 GHz ,且响应曲线较平坦。分析可知,在存在寄生振荡的情况下,一定值的 R_p 可以得到较平坦的响应。这是由于 R_p 达到某个值时,与寄生电容 L_p, C_p 构成了谐振回路,对激光器的频率响应带宽有补偿作用。因此为提高响应带宽,需要缩短金丝长度至 5 mm 左右($2 \Omega/mm$,总共约为 10Ω),并且引线远离地,以免产生无穷大的电阻值。

从 $0.28 \sim 5.0 \text{ nH}$ 改变引线电感 L_p 的值,如图3所示。当引线电感小于 1 nH 时,仿真得到的 3 dB 频

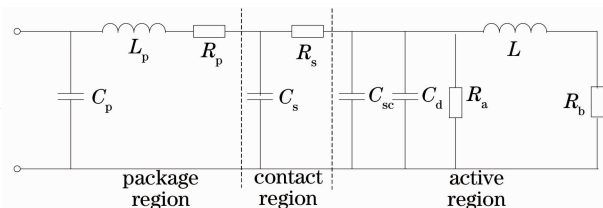


图1 含寄生参量的半导体激光器小信号等效电路模型

Fig. 1 Parasitic parameters of semiconductor laser small-signal equivalent circuit model

率响应带宽在 9.6 GHz 以下,且曲线高频段波动很大。然而金丝电感大于 2 nH 时,频率曲线很平坦,但是 3 dB 响应带宽最高才 4.2 GHz,且谐振峰达到 30 dB。只有当金丝电感是 1 nH 时 3 dB 频率响应带宽是 11.7 GHz,并且响应曲线较平坦。从上面的结果可以看到,利用这种谐振可以对器件的频响特性进行补偿,对带内信号响应的平坦度和带外信号的衰减速度有一定影响,并且过高的谐振峰会导致在大信号眼图中出现过冲,从而导致误码率的升高。但总的来说,在使用的频带范围内,综合考虑带内平坦度和频响带宽之间的关系,合理选择封装方法使产生的寄生参量 L_p 的值大小合适(约为 1 nH),进而达到有效扩展频响带宽的目的。

从 0.01~0.5 pF 改变引线电容 C_p 的值,如图 4 所示。当引线电容小于 0.05 pF 时,仿真得到的 3 dB 频率响应带宽在 8.1 GHz 以下,且曲线高频段响应变化很大。然而金丝电容大于 0.25 pF 时,频率曲线很平坦,但是 3 dB 响应带宽最高才 4.8 GHz。只有当金丝电容是 0.15 pF 时 3 dB 频率响应带宽是 14.1 GHz,并且响应曲线较平坦。分析看出电容 C_p 对半导体激光器的高频响应影响较大,故要提高激光器的高频响应,需要选择合适的 C_p 值(约为 0.15 pF),为此可采用特殊的封装方式(如同轴封装、蝶形封装等)来达到扩展频响的目的。

4 结 论

通过对激光器封装寄生参量精确的仿真计算,发现金丝引线电感、引线电容、欧姆电阻存在着谐振效应,谐振峰的位置和峰值随着参量而变化。因此,只需改变金丝的参量即可达到对芯片的 3 dB 频率响应带宽进行补偿的目的,有效补偿需要金丝的长度可以根据仿真得到的特性分析来确定。这种频率特性补偿的方法不需要另加其他元件,而仅仅利用封装过程中必不可少的金丝所带来的引线电感、引线电容、欧姆电阻就达到了改善激光器频率响应的目的。该方法还可以推广用于电吸收调制器等光电器件的封装设计中,并且为优化激光器封装提供了依据。

参 考 文 献

- Zhang S. J., Liu C., San H. S. *et al.*. A new method based on subtraction a high frequency modulation response of a semiconductor laser[J]. *Chinese J. Semiconductors*, 2005, **26**(6): 1224~1228
张尚剑,刘超,伞海生等.基于扣除法的半导体激光器高频响应仿真新方法[J].*半导体学报*, 2005, **26**(6): 1224~1228
- A. Ebberg, F. Auracher, B. Borchert. 10 Gb/s transmission using directly modulated uncooled MQW ridge waveguide DFB lasers in TO package[J]. *Electron. Lett.*, 2000, **36**(17): 1476~1477
- R. S. Tucker. Large-signal circuit model for simulation of injection-laser modulation dynamics[J]. *IEEE Proc I.*, 1981, **128**(5): 180~184

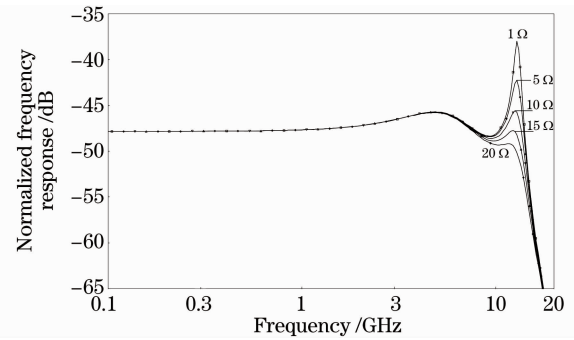


图 2 R_p 对频率响应的影响图

Fig. 2 R_p effectiveness to the frequency response

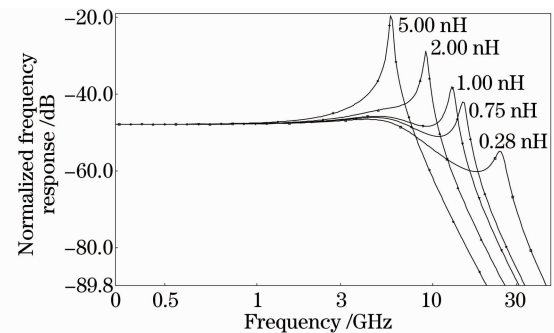


图 3 L_p 对频率响应的影响图

Fig. 3 L_p effectiveness to the frequency response

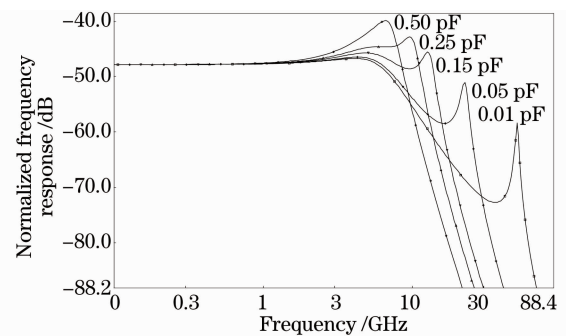


图 4 C_p 对频率响应的影响图

Fig. 4 C_p effectiveness to the frequency response

- 4 R. S. Tucker, D. J. Pope. Microwave circuit models of semiconductor injection laser[J]. *IEEE Trans.*, 1983, **31**(3): 289~294
- 5 Feng W. W., Wang Y. L., Zhu N. H.. Analysis of chirp characteristics of OFB lasers by equivalent circuit model[J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2005, **4**(26): 299~303
冯巍巍, 王幼林, 祝宁华. 从等效电路模型分析激光光源的啁啾特性[J]. *半导体光电*, 2005, **4**(26): 299~303
- 6 Jim Tatum. VCSEL packaging for data communication transceiver design[J]. *Fiberoptic Product News*, 2000, **24**(6): 21~23
- 7 Jianjun Gao. Microwave modeling and parameter extraction method for quantum-well laser[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2008, **26**(14): 2245~2250
- 8 Wang Z. R., Yu J. L., Zhang A. X.. Simulation and experiment study of the parameters of a 10 GHz DFB LD[J]. *J. Optoelectronics Laser*, 2003, **14**(12): 1299~1302
王卓然, 于晋龙, 张爱旭 等. 对 10 GHz DFB 激光器参数的数值模拟及实验[J]. *光电子激光*, 2003, **14**(12): 1299~1302