

掩埋隧道结 VCSEL 芯片小信号等效电路模型*

徐桂芝¹ Hofmann W² 黄亨沛¹ 张 韬¹ 谢 亮¹ 祝宁华^{1,†} Amann M C²

(1 中国科学院半导体研究所, 北京 100083)

(2 The Walter Schottky Institute, Technical University of Munich, Germany)

摘要: 提出了一种适用于一种 1.55 μm 掩埋隧道结垂直腔面发射激光器 (VCSEL) 芯片的小信号等效电路模型. 等效电路的提出是基于半导体激光器速率方程以及 VCSEL 芯片结构, 电路中各元件都有严格的物理意义. 根据实验测得芯片的反射系数及传输参数, 通过小信号等效电路仿真模拟, 得到电路各元件参数值. 不同偏置电流下, 模拟结果与实验结果吻合都非常好, 证明了该等效电路的有效性.

关键词: VCSEL; 等效电路模型; S 参数; 模拟

EEACC: 4320J; 2560B

中图分类号: TN365

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2006)11-2015-04

1 引言

近年来, 垂直腔面发射激光器 (VCSELs) 作为最有发展前途和实用价值的光发射器件之一, 一直是研究的热点. 相对于传统的边发射半导体激光器, VCSELs 有着很强的优势, 例如: 阈值电流低、光束发散角小、单纵模工作、易于集成、便于测量筛选、成本低等. 针对 850nm 波长 VCSELs 的研究已经相对成熟. 目前, VCSELs 的研究主要集中在适用于光纤通信的长波长范围, VCSELs 芯片的生长技术也在不断改进中, 各种各样的芯片结构相继涌现, 长波长 VCSELs 技术正逐步走向成熟.

VCSELs 的性能很大程度上取决于其芯片结构. 研究 VCSELs 的特性可以从其结构出发, 等效电路法即为一种合理有效的方法. 虽然将等效电路应用于 VCSELs 的研究已有报道^[1~4], 但其大部分的等效电路是从激光器的速率方程出发, 得到其微波等效电路, 对于 VCSELs 芯片部分的描述, 经常直接应用速率方程^[1,3]表示, 或者用表征激光器有源区的电路部分^[4]表示, 没有详细考虑芯片有源区外部的寄生参数, 或芯片本身的寄生参数跟外部寄生参数混合在一起. 具体描述 VCSELs 芯片结构的等效电路, 也曾见于报道^[5,6], 但报道中并没有模拟数据支持其等效电路. 本文根据 Hofmann 等人提供的具有共面电极结构的 1.55 μm VCSELs 芯片^[7], 提出其小信号等效电路. 此等效电路完全依照半导体激光器速率方程及芯片结构而设计, 给出一种更直观、更有效理解 VCSELs 的方法. 利用对芯片的测试结果, 通过等效电路的仿真模拟, 可以得到电路各元件的参数值. 更进一步通过调节电路元件参数值, 能够得到更好的模拟结果. 由于电路中每个元件都有其物理意义, 因而可以利用电路元件参数值对 VCSELs 芯片进行优化设计.

种更直观、更有效理解 VCSELs 的方法. 利用对芯片的测试结果, 通过等效电路的仿真模拟, 可以得到电路各元件的参数值. 更进一步通过调节电路元件参数值, 能够得到更好的模拟结果. 由于电路中每个元件都有其物理意义, 因而可以利用电路元件参数值对 VCSELs 芯片进行优化设计.

2 VCSEL 有源区计算模型的建立

描述光子和载流子相互作用的半导体激光器速率方程是分析单模激光器有源区响应的基本方程, 可表示为^[8]:

$$\frac{dN}{dt} = \frac{I_A}{qV_a} - \frac{N}{\tau_n} - GS \quad (1)$$

$$\frac{dS}{dt} = \Gamma GS - \frac{S}{\tau_p} + \Gamma \beta \frac{N}{\tau_n} \quad (2)$$

式中 N, S 分别为载流子密度和有源区内光子密度; τ_n 和 τ_p 表示载流子和光子寿命; Γ, β 分别是光场限制因子和自发辐射因子; V_a 是有源区的体积; I_A 是注入有源区的电流; G 是增益系数, 为载流子密度 N 和 S 的函数, 常表示为:

$$G(N, S) = g_0(N - N_t)(1 - \epsilon S) \quad (3)$$

其中 g_0 是光增益常数; N_t 是透明载流子密度; ϵ 是光增益压缩因子.

利用(3)式对(1)和(2)式进行归一化, 令

$$\begin{cases} I_A = I_0 + \Delta I, & I_0 \gg |\Delta I| \\ N = N_0 + \Delta N, & N_0 \gg |\Delta N| \\ S = S_0 + \Delta S, & S_0 \gg |\Delta S| \end{cases} \quad (4)$$

其中 I_0, N_0, S_0 是偏置分量, 即调制信号 ΔI 等于

* 国家自然科学基金(批准号: 60510173, 60536010, 60506006)和德国基金委资助项目

† 通信作者. Email: nhzhu@semi.ac.cn

2006-06-08 收到, 2006-06-30 定稿

0 时的稳定状态值. 代入(1)和(2)式, 可得

$$0 = \frac{I_0}{qV_a} - \frac{N_0}{\tau_n} - G_0 S_0 \quad (5)$$

$$0 = \Gamma G_0 S_0 - \frac{S_0}{\tau_p} + \Gamma \beta \frac{N_0}{\tau_n} \quad (6)$$

设

$$\begin{aligned} \Delta I &= \text{Re}\{ie^{j\omega t}\}, \quad |i| \ll I_0 \\ \Delta S &= \text{Re}\{se^{j\omega t}\}, \quad |s| \ll S_0 \end{aligned} \quad (7)$$

对于 pn 结, 其结电压与载流子密度之间可用经典的 Shockley 关系表示^[9]:

$$N = N_e [\exp(qV_j/2kT) - 1] \quad (8)$$

把(7)式进行微分并利用 $V_j = V_{j0} + \Delta v_j$ 及 $\Delta v_j = \text{Re}\{v_j e^{j\omega t}\}$ 可以得到:

$$\Delta N = \frac{qN_0}{2kT} \text{Re}\{v_j e^{j\omega t}\} \quad (9)$$

利用(3)~(9)式把(1)和(2)式归一化并化简, 得到变换的小信号速率方程:

$$\begin{aligned} i &= v_j(j\omega C_a + \frac{1}{R_d}) + i_s \\ v_j &= i_s \{j\omega L_a + R_a\} \end{aligned} \quad (10)$$

其中

$$i_s = qV_a g_0 (N_0 - N_t)(1 - 2\epsilon S_0) s \quad (11)$$

$$R_x = \frac{2kT\tau_n}{q^2 V_a N_0} \quad (12)$$

$$R_d = \frac{R_x}{1 + g_0 \tau_n (1 - \epsilon S_0) S_0} \quad (13)$$

$$C_a = \frac{\tau_n}{R_x} \quad (14)$$

$$L_a = \frac{R_x}{\Gamma g_0 (N_0 - N_t)(1 - 2\epsilon S_0) [\beta + g_0 \tau_n (1 - \epsilon S_0) S_0]} \quad (15)$$

$$R_a = [\Gamma g_0 (N_0 - N_t) \epsilon S_0 + \Gamma \beta \frac{N_0}{S_0 \tau_n}] L_a \quad (16)$$

由(10)式建立 VCSELs 有源区等效电路部分, 用一个电感(L_a)和一个电阻(R_a)串联, 再并联一个电容(C_a)和一个电阻(R_d)来表示, 如图 1 所示.

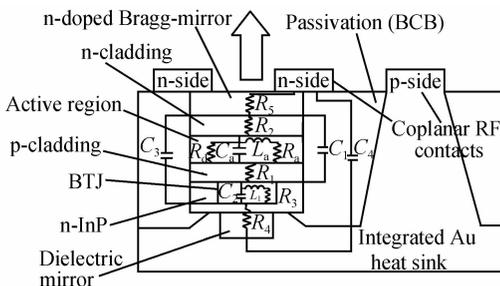


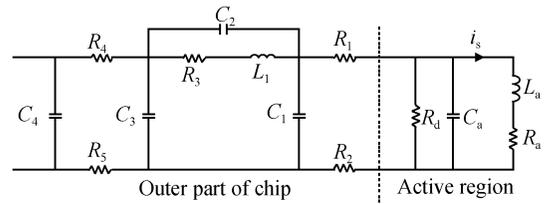
图 1 VCSEL 芯片剖面及等效电路图

Fig. 1 Schematic cross section of VCSEL chip with equivalent circuit

3 VCSEL 芯片小信号等效电路

图 1 是 Hofmann 等人提供的具有共面电极结构的 VCSEL 芯片^[7], 以及基于此结构, 本文提出的等效电路. 由于具有共面电极结构, VCSEL 芯片可通过 RF 探针直接与矢量网络分析仪的测试端口连接. 早期一些 VCSELs 或者其他半导体激光器因为没有这种共面结构, 需要把其中一个电极用金丝压焊到一个与另一电极共面的金属接触层, 以实现与矢量网络分析仪测试端口的连接. 进行测试的时候, 由金丝带来的寄生效应会直接影响到测试结果. 因而, 这种具有共面电极结构的 VCSEL 芯片可以避免此类寄生效应, 使得对芯片的本征测试更准确.

把图 1 中等效电路提取出来, 即如图 2 所示. 在这个电路模型里, 右侧部分是 VCSEL 的有源区, 如前所述, 这部分结构由激光器速率方程确定; 左侧部分是芯片有源区外部寄生参数. R_1 和 R_2 分别为有源层两侧的 p 包层 (p-cladding) 和 n 包层 (n-cladding) 的电阻. C_1 为 p 包层和 n 包层之间的电容. 芯片的 BTJ (buried tunnel junction)^[10] 是 VCSEL 芯片的特殊结构, 对注入电流及发光有很好的限制作用. BTJ 是重掺杂的 p-n 结, 等效电路中用类似有源区的电路结构, 即电感 L_1 和电阻 R_3 串联, 再与 C_2 并联来表示 BTJ 层. 从后面的表 1 中可以看到, L_1 远大于 L_a , C_2 比 C_a 低两个数量级, R_3 比 R_a 高两个数量级左右. C_3 为 n 包层与 BTJ 层之间的电容, R_4 为 BTJ 层经由介质反射镜到 p 电极的电阻, R_5 为 n 掺杂布拉格反射镜的电阻. 电路最左侧的 C_4 为 p 电极与 n 电极之间钝化层的电容.



分析仪进行双端口开路-匹配-直通 (SOLT) 方法校准, 将其测试参考面校准到两同轴端口, 然后在网络分析仪一同轴端口接上 Cascade ACP-GS 200 微波探针, 用 Cascade 103-736 校准件和开路-短路-匹配负载 (OSL) 方法校准探针^[11]. 光探测器的频率响应通过光外差的方法获得^[12], 并从“激光器-探测器”整体传输系数中扣除, 以获得真实可靠的 VCSEL 芯片本身的 S 参数.

实验中所用 VCSEL 的阈值电流为 0.5mA, 最大偏置电流为 10mA. 所以我们分别设置偏置电流为 1.1, 1.7, 2.7, 4.1, 6.0 和 8.2mA, 对芯片进行 S 参数测量. 利用实验数据, 对该等效电路进行仿真模拟, 即可得到电路各元件值. 表 1 是 4.1mA 偏置电流下, 电路中各元件的值. 其他偏流下电路各元件的值没有在此一一列出.

表 1 4.1mA 偏置电流下电路各元件值

Table 1 Values of elements of circuit at 4.1mA bias current

电路元件	数值	电路元件	数值	电路元件	数值
R_a	38.18m Ω	R_1	14.32 Ω	C_1	0.4375pF
L_a	1.032pH	R_2	15.62 Ω	C_2	0.0251pF
C_a	175.1pF	R_3	18.11 Ω	C_3	1.3187pF
R_d	0.1543 Ω	R_4	2.188 Ω	C_4	0.0148pF
		R_5	9.031 Ω	L_1	637.72pH

图 3 为 4.1mA 偏置电流下, 实验数据与模拟结果的比较. 其中 (a) 为实验测得和模拟反射参数 S_{11} 的史密斯圆图, (b) 为实验测得和模拟 S_{11} 的幅度, (c) 为实验测得和模拟传输系数 S_{21} 的归一化幅度. 显然, 实验数据与模拟结果吻合非常好. 图 4 是不同偏置电流下, 实验测得与模拟 S_{21} 频率响应曲线的比较. 把每个偏置电流下实验测得的 S_{21} 与其模拟结果看作一组曲线, 共得到六组曲线, 每组曲线均归一化, 然后在图 4 中起点每隔 10dB 给出. 可以看出, 不同偏流下实验数据与模拟结果非常吻合. 不同偏流下 S_{11} 也吻合非常好, 与图 3 中给出结果类似, 因此, 不同偏流下 S_{11} 的比较不在这里赘述. 实验数据与模拟结果良好的一致性, 充分说明本文所提出的等效电路的有效性.

调节电路中各元件参数值, 可以发现其对整个仿真结果的影响. 反射参数 S_{11} 只受芯片有源区外部寄生参数影响, 而与有源区部分的等效电路元件参数值无关. 频率响应 S_{21} 不仅与有源区电路部分有关, 还受芯片有源区外部寄生参数的影响, 例如, 减小 C_3 的值, 频率响应变得更平坦, 而且 3dB 带宽也明显增大. 光通信用 VCSEL 的频率响应对其应

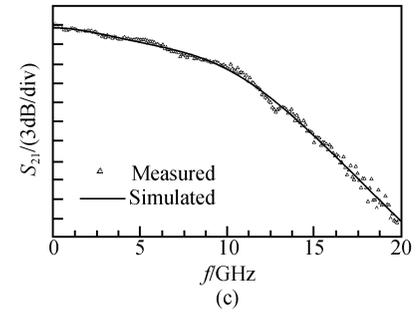
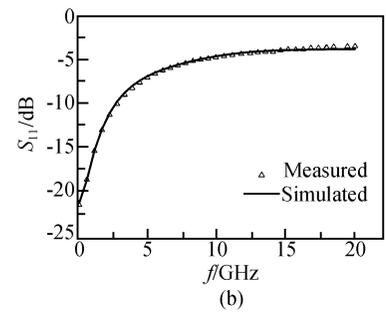
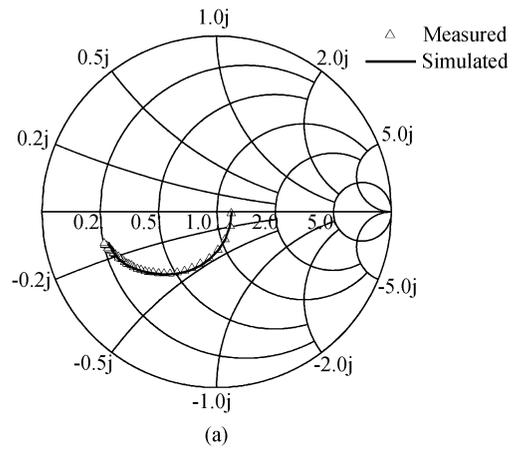


图 3 4.1mA 偏置电流下实验数据与模拟结果比较
Fig. 3 Comparison of measured and simulated S parameter at 4.1mA bias current

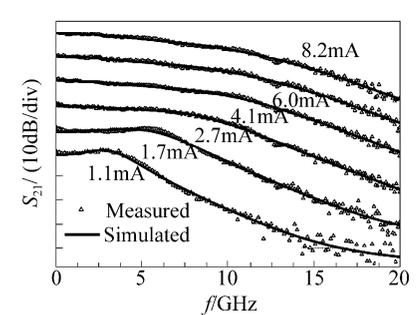


图 4 不同偏置电流下实验测得与模拟响应比较
Fig. 4 Comparisons of measured and simulated S_{21} at different bias currents

用具有决定性作用,因而对器件性能的优化是非常重要的且值得研究的.芯片有源区部分对 VCSEL 频率响应起主要决定作用,有源区材料、尺寸等的选择涉及到很多因素.所以,首先选择性能好的有源区,一旦有源区确定,VCSEL 的本征响应也即确定.通过调节芯片外部寄生电路元件值,可以得到更好的 VCSEL 频率响应,使 VCSEL 得到优化.

5 结论

本文提出适用于一种具有共面电极结构的 BTJ-VCSEL 芯片的小信号等效电路模型.在不同偏置电流下,利用实验测得反射系数和传输频响,等效电路经过仿真模拟,得到与实验数据吻合非常好的模拟结果,并得到了电路中各元件值.通过改变这些电路元件值,就可以改善 VCSELs 的特性.由于等效电路模型中各元件都有其物理意义,通过调节等效电路中各元件值,可以获得预期的芯片特性,达到优化设计 VCSELs 的目的.

参考文献

- [1] Bruensteiner M, Papen G C. Extraction of VCSEL rate-equation parameters for low-bias system simulation. *IEEE J Quantum Electron*, 1999, 5(3): 487
- [2] Rissons A, Perchoux J, Mollier J C. Small signal and noise circuit model of vertical-cavity surface-emitting laser (VCSEL) arrays for short range optomicrowave links. *International Topical Meeting on Microwave Photonics*, 2003: 211
- [3] Minoglou K, Kyriakis-Bitzaros E D, Syvridis D, et al. A compact nonlinear equivalent circuit model and parameter extraction method for packaged high-speed VCSELs. *J Lightwave Technol*, 2004, 22(12): 2823
- [4] Mao L H, Chen H D, Tang J, et al. Small signal equivalent circuit model of vertical cavity surface emitting lasers. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2002, 23(1): 82
- [5] Lear K L, Ochiai M, Hietala V M, et al. High-speed vertical cavity surface emitting lasers. *Digest of the IEEE/LEOS Summer Topical Meetings*, 1997: 53
- [6] Lim D H, Hwang S M, Nam S H. High-speed modulation of 850-nm vertical-cavity surface-emitting lasers. *The 14th Annual Meeting of the IEEE LEOS*, 2001, 2: 724
- [7] Hofmann W, Zhu N H, Ortsiefer M, et al. 10 - Gb / s Data transmission using BCB passivated 1.55 μm InGaAlAs-InP VCSELs. *IEEE Photonics Technol Lett*, 2006, 18(2): 424
- [8] Gao J J, Li X P, Boeck G. Direct parameter-extraction method for laser diode rate-equation model. *J Lightwave Technol*, 2004, 22(6): 1604
- [9] Tucker R. High-speed modulation of semiconductor lasers. *J Lightwave Technol*, 1985, 3(6): 1180
- [10] Ortsiefer M, Shau R, Mederer F, et al. High-speed modulation up to 10Gbit/s with 1.55 μm wavelength InGaAlAs VCSELs. *Electron Lett*, 2002, 38(20): 1180
- [11] Chen Z Y, Wang Y L, Zhu N H. Two-port calibration of the test fixtures with different test ports. *Microw Opt Technol Lett*, 2002, 35(4): 299
- [12] Zhu N H, Wen J M, San H S, et al. Improved optical heterodyne methods for measuring frequency responses of photo-detectors. *IEEE J Quantum Electron*, 2006, 42(3): 241

Small Signal Equivalent Circuit Model of Buried Tunnel Junction VCSEL Chips*

Xu Guizhi¹, Hofmann W², Huang Hengpei¹, Zhang Tao¹, Xie Liang¹,
Zhu Ninghua^{1,†}, and Amann M C²

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

(2 The Walter Schottky Institute, Technical University of Munich, Germany)

Abstract: An equivalent circuit model for a 1.55 μm buried tunnel junction VCSEL chip is proposed. The model is based on the semiconductor laser rate equations and the structure of the VCSEL chip, and every element in the circuit is represented. Values of the elements of the circuit are established using the reflection coefficient and transmission frequency response data. The simulation results agree well with experimental data at different bias currents, verifying the validity of the equivalent circuit model.

Key words: VCSEL; equivalent circuit model; S parameter; simulation

EEACC: 4320J; 2560B

Article ID: 0253-4177(2006)11-2015-04

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Nos. 60510173, 60536010, 60506006)

† Corresponding author. Email: nhzhu@semi.ac.cn

Received 8 June 2006, revised manuscript received 30 June 2006