

文章编号: 0258-7025(2002)Supplement-0170-03

VCSEL 器件的高频模拟与实验

杨宜阮玉江毅李正佳

(华中科技大学激光技术国家重点实验室, 武汉 430074)

摘要 垂直腔面发射激光器(VCSEL)作为一种新型的半导体激光器,已经在计算、网络、传感以及其他应用领域产生了巨大影响。就通信用 VCSEL 的高频特性进行讨论,提出了一种可行的 VCSEL 等效电路模型。使用通用的电路仿真器 SPICE 对其调制特性进行了模拟,并且通过实验得到了高频调制下 VCSEL 的特征曲线。对进一步优化基于 VCSEL 的数据通信网络性能进行了有益的探索。

关键词 VCSEL, 数据通信, 高频, SPICE 仿真

中图分类号 请给出 文献标识码 A

Simulation and Experimentation of VCSEL under High Frequency Modulation

YANG Yi RUAN Yu JIANG Yi LI Zheng-jia

(State Key Lab. of Laser Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074)

Abstract As a new type of semiconductor lasers, VCSELs have had great influence upon many fields, such as computation, network, sensing, and so on. This papers made some discussions about the performance of VCSELs, applied in optical communication, under high-frequency modulation. A practicable model of its equivalent circuit was brought forward. The authors simulated VCSELs modulating characteristic with PSPICE, the general circuit simulator, and got its characteristic curves at high bit rate by experiment. Those are helpful for optimizing the performance of VCSEL-based data communication networking.

Key words VCSEL, data communication, high frequency, SPICE simulation

1 引言

垂直腔面发射激光器(VCSEL)随着现代高速短波长光纤网络的发展已经成为光通信领域最理想、最有前途的光源。与一般的边缘发射半导体激光器相比,VCSEL 具有更低的阈值、功耗和生产成本;更高的效率、调制带宽和温度稳定性;更小、更对称的光束发散角等优越的性能。其在 Gigabit Ethernet 和 Fiber Channel 中的应用取得了巨大的成功。虽然已有很多有关 VCSEL 的文献,但鲜有涉及这一器件在典型数据通信链路上的特性和表现的报道。本文就 VCSEL 作为高速数据通信光源应用的几个问题进行了讨论。

实验中所用激光器由 MOCVD 技术生长,设计出射波长为 850 nm,其原理结构如图 1 所示。衬底选用 n -GaAs 单晶片; p 反射镜堆由 20.5 对交替的 $AlAs/Al_{0.15}Ga_{0.85}As$ 层组成;有源区是一个单波腔,包括三个 GaAs 量子阱以及上下限制层 $Al_{0.25}$

$Ga_{0.75}As$ 和 $Al_{0.6}Ga_{0.4}As$; n 反射镜堆由 22.5 对 $AlAs/Al_{0.15}Ga_{0.85}As$ 层组成。电流限制依靠质子轰击获得,内部直径 20 μm ,上部金属电极孔径 15 μm 。首先通过直流实验测得分别在 10 $^{\circ}C$ 、40 $^{\circ}C$ 、70 $^{\circ}C$ 时典型前向电压和激光输出功率与输入电流的关系如图 2 所示。

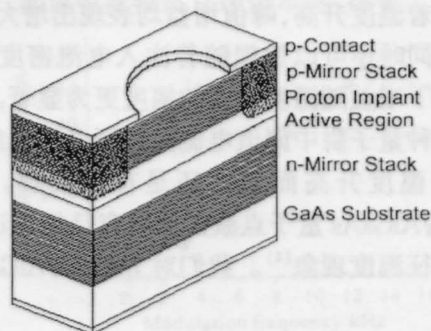


图 1 VCSEL 原理结构图
Fig.1 VCSEL schematic

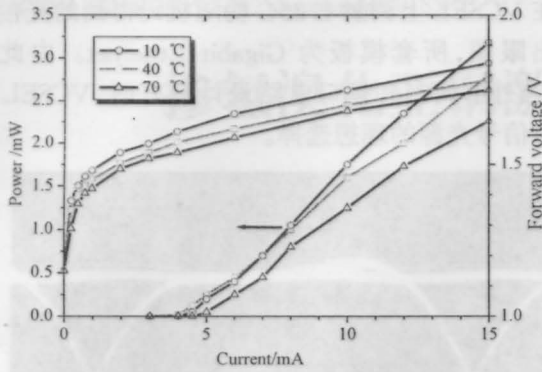


图2 不同温度下的典型 LIV 曲线

Fig.2 Typical LIV curves for 10 °C, 40 °C and 70 °C

2 等效电路模型

建立实用的 VCSEL 等效电路模型对于设计 VCSEL 高速驱动接口电路是非常有意义的。图 3 所示是一个适用于低偏置电流的等效模型,包括引线电感 L_b ; VCSEL 晶片的旁路电容 C_p ; 由金属电极接触和布拉格反射镜堆的阻抗产生的串行电阻 R_s ; 激光器的 $p-n$ 结用并联的电容 C_j 和电阻 R_j 来模拟。微分载流子寿命 τ_d 由下式给出: $\tau_d = R_j C_j$ 。

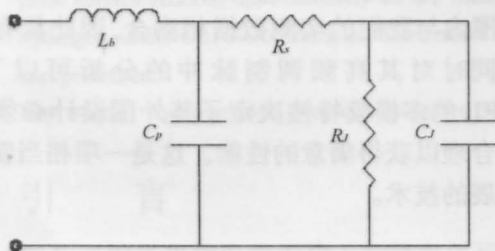


图3 VCSEL 等效电路模型

Fig.3 VCSEL equivalent circuit

3 阻抗特性模拟与实验

正如我们所熟知的,器件的阻抗特性对于高频电路的设计是至关重要的。为了准确测量激光器的阻抗,尽可能减少封装寄生参数的影响,VCSEL 通过金丝被直接安装在铜质电路板上,由引线连接 50 Ω 定制陶瓷带状线完成电接触。这一带状线上可以连接高速微波探头,且所选探头和带状线的带宽都不低于 20 GHz。在微带线的另一端用网络分析仪测量作为频率和直流偏置电流的函数的反射系数 S_{11} ,以得到阻抗特性曲线。

实验测得在小偏置电流下 VCSEL 阻抗数值和相位如图 4 中实线所示。同时,根据上面给出的模

型使用 PSPICE 进行阻抗特性模拟,仿真结果在图 4 中用虚线示出。各元件值分别为 $L_b = 0.25$ nH, $C_p = 0.8$ pF, $R_s = 35$ Ω , $\tau_d = 1.75$ ns。

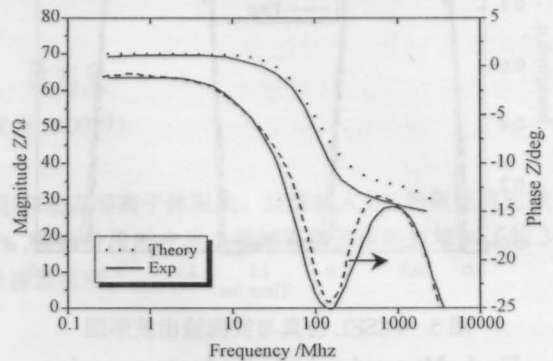


图4 VCSEL 仿真与实测阻抗曲线

Fig.4 Measured and calculated VCSEL impedance

阻抗测试结果表明:在低频区,VCSEL 的阻抗为实值,等于 R_s 和 R_j 之和。随着频率的增高, $p-n$ 结容性占优,阻抗的实部逐渐降为 R_s 。对比等效电路模拟结果与 VCSEL 测试结果可以看出,两者在较大温度和电流变化范围内吻合得很好,进一步验证了上述模型的可行性。

4 高频调制特性

激光器的调制特性参数主要包括:脉冲上升时间,下降时间,抖动,小信号带宽,以及开关延迟等。这些参数的准确需求值由特定通信协议的适当标准来定义,但在实际应用中激光器的适用性主要依靠“眼图”测量决定,即看其“眼图”能否吻合相关标准的模板。当 VCSEL 应用于超过 1 GB/s 的数据率时,对其高频调制特性的讨论就非常有必要了。

依然使用我们的简单模型,以 622 MHz 方波脉冲源激励,得到的仿真光脉冲输出如图 5 中虚线所示。同时使用 Mindspeed 的 VCSEL 驱动器 MC2062 调制同频方波信号,VCSEL 模块的输出以高频示波器显示为图 5 中实线。从图中可以看出,VCSEL 的 0~80% 上升时间和 100~20% 下降时间都相当快,实际测得所选择样片的 $t_R \leq 100$ ps, $t_F \leq 150$ ps (20%~80%)。从这一点来说,VCSEL 是非常适合于高速信号调制的。

正如图 5 所示,脉冲下降沿的末端存在不规则的拖尾效应。这一效应的长短一般与快速的边沿速度无关,甚至可以扩展到 1.5 ns。不同的器件有不同的表现,一个极端情况是“尾巴”呈现很大的过冲,然后缓慢下降;另一个极端是“尾巴”缓慢上升。总

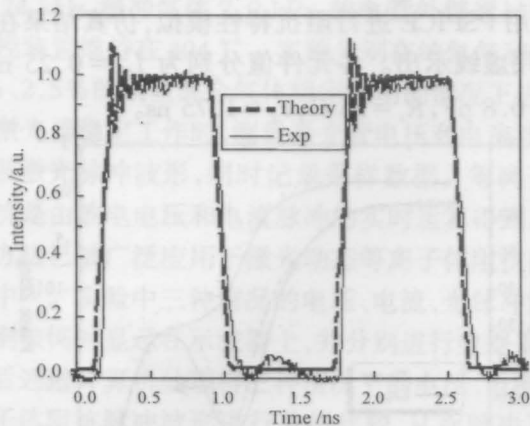


图5 VCSEL 仿真与实测输出波形图

Fig. 5 Measured and calculated output waveform of VCSEL

的来说,一般器件处于这两种极端情况之间并随着偏置状况而变化。

我们知道空间烧孔和载流子扩散是导致模式强烈竞争的主要机制,特别是各模式间高度交叠时,经常导致单一模式占优。VCSEL 是单纵模多横模激光器,当模式间有着足够的空间不相关性时,它们可能无关的出射虽然仍旧竞争着相同的整个增益。在出射光关断后,空间烧孔引起的载流子梯度导致别处的载流子扩散进入已关断区域,使之重新上升至阈值以上。这就出现了以上关断后回弹的现象。

还可以注意到:在脉冲的上升沿存在显著的过冲振荡,甚至加上滤波器滤除弛豫振荡后依然存在。要解释这一现象,我们引入模式“遮挡”的概念(如由环形金属电极引起的对激发区域的阻挡)。如前所述,具有空间不相关性的多横模激光器在整个有源区被抽运时,一些区域已经开始激射,而另一些区域仍低于阈值。也就是说各个模式的激射时延不同。这将导致某些模式出现很大过冲,而另一些则欠冲然后缓慢爬升至平衡位置。显然,当所有模式加在一起显示全部能量时,这两种行为互相补偿。但当阻挡某些模式后,这种互补被打破,结果将表现为过冲振荡或缓慢上升。

因此,在分析高速调制特性时必须强调一下事实:虽然其上升下降沿足够快,VCSEL 的多横模结构决定了其表现的较慢的拖尾和回弹现象;当分析其上升时间时,把上述“遮挡”效应考虑进去是非常重要的。同时,良好的激光驱动器设计将大大减小这种遮挡效应。图 6 所示是我们设计的激光驱动电

路在 VCSEL 上调制 1.25G 伪随机码得到的光信号输出眼图,所套模板为 Gigabit Ethernet。由此可知:当外部调制和接口电路设计良好时,VCSEL 是高速信号光源的理想选择。

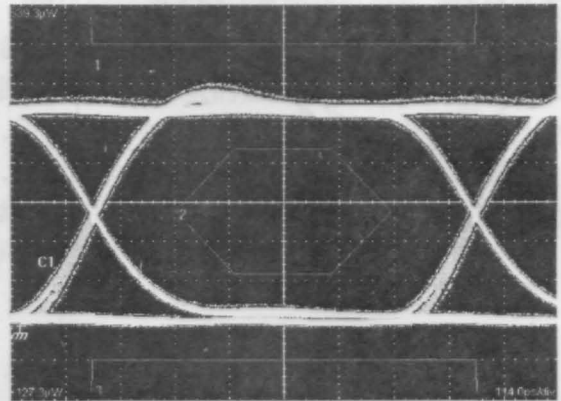


图6 应用于千兆以太网的 VCSEL 发射模块输出眼图

Fig. 6 Output eye of VCSEL for GBE application

5 结 论

VCSEL 是未来高速局域网和城域网应用的理想光源。我们给出的等效电路模型对设计 VCSEL 高速接口电路是有益的。模型虽然简单,但其在很大范围内与我们的实测数据相吻合,因此具有可行性。同时对其高频调制脉冲的分析可以了解:VCSEL 的多横模特性决定了其外围设计必须更仔细更合理以获得满意的性能。这是一项相当新且飞速发展的技术。

参 考 文 献

- 1 C. W. Wilmsen *et al.*. *Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers*. Cambridge University Press, 1999
- 2 David Smith. Characterizing components for high speed data interconnects. Honeywell Application Note, 2000
- 3 Optical Interfaces for Equipments and systems relating to the synchronous Digital Hierarchy, ITU-T Recommendation G. 957, 1993
- 4 A. Valle, J. Sarma, K. A. Shore. Spatial holeburning effects on the dynamics of vertical cavity surface-emitting laser diodes. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1995, **31**(8): 1423~1431
- 5 Y. Lam, J. P. Loehr. Comparison of steady-state and transient characteristics of lattice-matched and stained InGaAs-AlGaAs (on GaAs) and InGaAs-AlInAs (on InP) quantum-well lasers. *IEEE J Quantum Electron.*, 1992, **28**(5):1248~1260