

文章编号: 0258-7025(2003)03-0193-06

基于速率方程的垂直腔表面发射半导体 激光器温度模型与仿真

杨宜¹, 阮玉², 李正佳¹

(华中科技大学¹激光技术国家重点实验室, ²光电子工程系, 湖北 武汉 430074)

摘要 建立了一个基于速率方程、考虑了热效应、可以模拟非直流(即小信号和瞬态调制下)特性,且适用于通用电路仿真器的垂直腔表面发射半导体激光器(VCSEL)的简单等效电路模型。并通过 PSPICE 仿真结果与实验对比验证了模型的适用性。

关键词 激光技术;垂直腔表面发射半导体激光器;速率方程;温度模型;SPICE 仿真

中图分类号 248.4 文献标识码 A

Rate-equation-based VCSEL Thermal Model and Simulation

YANG Yi¹, RUAN Yu², LI Zheng-jia¹

(¹State Key Lab. of Laser Technology, ²Optoelectronics Engineering Department,
Huazhong Univ. of Sci. & Tech., Wuhan, Hubei 430074, China)

Abstract A rate-equation-based VCSEL thermal model is established, which can simulate the features in the non-dc operating regimes, namely, small-signal and transient modulating condition. The model is apt to implement in conventional SPICE-like circuit simulators, including PSPICE, and used to simulate key features of VCSEL. The results compare favorably to experimental data from two devices reported in the literature.

Key words laser technique; VCSEL; rate equation; thermal model; SPICE simulation

垂直腔表面发射半导体激光器(VCSEL)具有单纵模运行、圆截面出射光、易于构成二维阵列、适于在线晶片级测试等优越性能,近年来受到了越来越多的关注。当然它也存在与边发射激光器相比较弱的地方,如:由于高阶横模存在的多模运行;载流子扩散和空间烧孔导致的模式竞争和脉冲关断后的回弹现象也是限制 VCSEL 性能的一些因素。但是,普遍认为最显著的限制来自于热效应。

由于其较差的散热和分布式布拉格反射器(DBR)引入的较大阻抗,典型的 VCSEL 存在相对严重的热效应,因此也就表现出较强的温度依赖特性。显然,为了有效地进行包含 VCSEL 器件的光电系统设计,有必要建立一个考虑热效应的 VCSEL 等效模型。现有的大部分模型都是基于大量数值计算和对 VCSEL 热行为的详细多维分析^[1~4],这些

模型在准确的同时计算量也非常大,从而使它们在光电系统计算机辅助设计中的运用并不乐观。也有不少模型可以模拟 VCSEL 的静态 $L-I$ 特性而不需要进行复杂的多维分析,如:Yu 等的 VCSEL 速率方程描述^[5];Su 等利用与温度相关的模型参数导出了一个简化的静态模型^[6]。这些模型确实简单易用,但普遍局限于直流模拟。

本文试图建立一个考虑了热效应,可以模拟 VCSEL 非直流特性且适用于通用电路仿真器的简单等效模型。这种适于计算机辅助设计(CAD)的准经验模型将大大简化光电系统设计。

1 等效电路模型的建立

很多机制导致了 VCSEL 较强的温度依赖特

收稿日期:2001-12-27;收到修改稿日期:2002-02-26

作者简介:杨宜(1976—),男,华中科技大学光电系博士研究生,主要从事光通信技术和关键光电子器件研究。E-mail: microyang@263.net

性,如:俄歇复合和能带吸收引起的光学损耗等在热效应中起到一定作用,但最主要的影响来自与温度相关的激光增益和有源区的载流子泄漏。

1.1 空间相关的速率方程

使用速率方程来描述激光器的运行特征是一种被广泛接受的技术。构成本文模型基础的空间相关速率方程来自于 Moriki^[7]和 Mena 等^[8]的文献,我们通过引入温度相关的增益和描述有源区载流子泄漏的电流项来表征 VCSEL 的热效应。

首先,有源区载流子数目 N 为

$$\frac{\partial N(\mathbf{r}, t)}{\partial t} = \frac{\eta I(\mathbf{r}, t)}{q} - \frac{N(\mathbf{r}, t)}{\tau_n} - \sum_k G_k(\mathbf{r}, t) S_k(t) \phi_k(\mathbf{r}) + \frac{L_{\text{eff}}^2}{\tau_n} \nabla^2 N(\mathbf{r}, t) - \frac{I_l(N, T)}{q} \quad (1)$$

式中 I 表示注入电流; S_k 和 ϕ_k 分别为第 k 个横模的总光子数和其归一化模场分布; T 表示器件温度; G_k 是第 k 个横模的增益; I_l 表示热泄漏电流; η 为电流注入效率; τ_n 为载流子寿命; L_{eff} 表示有效载流子扩散长度; q 为电子电量。(1) 式与文献[7] 中(7) 式很相似,主要区别在于增加了热增益和泄漏电流项。扩散由载流子密度的拉普拉斯运算引入。

第 k 个模式总光子数目 S_k 为

$$\frac{\partial S_k(t)}{\partial t} = - \frac{S_k(t)}{\tau_{pk}} + \frac{\beta_k}{\tau_n} \cdot \int_{V_T} N(\mathbf{r}, t) dV + \int_{V_T} G_k(\mathbf{r}, t) S_k(t) \phi_k(\mathbf{r}) dV \quad (2)$$

式中 β_k 和 τ_{pk} 分别为第 k 个模式的自发辐射耦合系数和光子寿命; V_T 为有源区的总体积。

(1) 和(2) 式不仅描述了 VCSEL 的空间相关特性,更提供了温度相关增益 G_k 和有源区载流子泄漏 I_l 的模型框架。通过使用两者与温度的经验关系式,可以避免基于细节物理描述的复杂运算。

1.2 温度相关增益

对于模型中的增益项 G_k ,作者接受在基于速率方程的激光模型中普遍使用的线性关系: $G_k \sim G_0(N - N_t)$, 这里 G_0 和 N_t 分别指增益常数和透明载流子数目。而且把 G_0 和 N_t 表示为温度的函数,这也是在很多关于边发射激光器和 VCSEL 的文献中广泛使用的方法。在边发射激光器中,增益和透明载流子数被定义为温度的线性函数或类似 $\exp(\pm T/T_X)$ 的指数函数等等。而在 VCSEL 场合,也常常使用相似的表达式。Hasnain 等用一个温度相关的增益谱 ($\lambda(T)$) 与一个温度的倒数函数 ($1/T$) 的

组合来建立微分增益模型: $g' \propto a/T \times \{1 - 2[\lambda(T) - \lambda_p(T)]^2 / \Delta \lambda^2(T)\}$, 且定义透明载流子密度是温度的线性函数^[9]。Scott 等使用对数表达式作为 VCSEL 的增益模型,其中把增益常数和透明载流子数目描述为温度的多项式^[10]。

在现有模型的基础上,本文确立了一个具有更普遍意义的经验表达式。定义 N_t 为温度的二次函数: $(c_0 + c_1 T + c_2 T^2)$; G_0 为两个二次函数的比值: $(a_0 + a_1 T + a_2 T^2) / (b_0 + b_1 T + b_2 T^2)$ 。从本质上说,这些表达式是 Hasnain 使用等式的推广,因为如果假设文献[9] 中温度相关增益谱的 FWHM 是温度的平方根函数, λ 和 λ_p 是温度的线性函数,则可以将 g' 简化为: $(a_0 + a_1 T + a_2 T^2) / T^2$ 。同样,二次函数模型也可以从 Scott 使用的等式变形得到。图 1 所示为用本文的经验表达式对 Scott 模型计算的数据进行拟合的结果。可以看到,两者能够获得极好的吻合。因此 G_k 的完整表达式为

$$G_k(\mathbf{r}, t) = \frac{G(T)[N(\mathbf{r}, t) - N_t(T)]}{1 + \sum_m \epsilon_{mk} S_m(t)} \quad (3)$$

$$G(T) = G_0 \cdot \frac{a_0 + a_1 T + a_2 T^2}{b_0 + b_1 T + b_2 T^2} \quad (4)$$

$$N_t(T) = N_{t0} \cdot (c_0 + c_1 T + c_2 T^2) \quad (5)$$

其中, G_0 和 N_{t0} 分别为与温度无关的增益常数和透明载流子数; $a_0 \sim a_2$, $b_0 \sim b_2$ 和 $c_0 \sim c_2$ 是经验常数,不同器件的常数值由实验所得温度相关增益谱曲线拟合得到,对于增益波导和折射率波导结构分别使用文献[9] 和[10] 的拟合方式; ϵ_{mk} 表示由模式 m 引起的模式 k 的增益饱和系数。

1.3 有源区载流子泄漏

由于载流子泄漏导致激光器的总效率下降,将

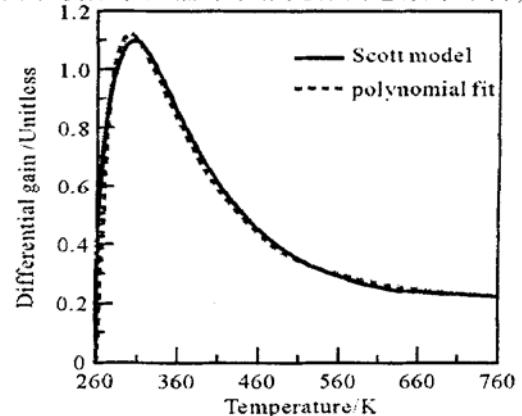


图 1 差分增益经验表达式与 Scott 模型的比较
Fig. 1 Comparison of differential gain with the model of Scott et al.

它通过一个被减去的电流 I_l 引入(1)式的模型中。显然,这一泄漏电流应该是载流子数和温度的函数。Scott 等^[10]将泄漏电流描述为 quasi-Fermi 能级间隔 ΔE_{fcv} 的函数,为了简化进一步进行了 ΔE_{fcv} 作为载流子密度函数的计算,然后使用曲线拟合获得了 $\Delta E_{fcv} - E_{gB}$ 与载流子数及温度的关系。其解析关系式为: $\Delta E_{fcv} - E_{gB} = -d_0 + d_1n + d_2nT - d_3/(n + d_4)$, 这里 n 为载流子密度, $d_0 \sim d_4$ 为拟合常数。对他们的结果进行分析可知, d_4 对最终结果影响很小,故可忽略。如果使用这一表达式并将其代入异质结二极管方程,得到以下作为载流子数和温度函数的热泄漏电流方程

$$I_l = I_{l0} \cdot \exp \left[-d_0 + d_1N + d_2NT - \frac{d_3}{N} \right] / T \quad (6)$$

图 2 给出了 250~ 400 K 温度下,基于文献[10]中的 $d_0 \sim d_4$ 值的 I_l 计算曲线。可以看出,250 K 时在载流子数低值处泄漏电流几乎可以忽略,到达一定阈值后剧烈上升;随着温度增加,泄漏对载流子数目的依赖程度更加灵敏。必须指出,当载流子数达到非常高后,(6)式的 I_l 实际上随温度上升而下降。但是,正如后面从实验数据中提取参数时可以看到,这段区域在实际中是很难遇到的。另外,一个器件模拟计算时拟合的各常数值对另一个器件是不一定有效的,必须参照文献[10]拟合得到新的调整参数。

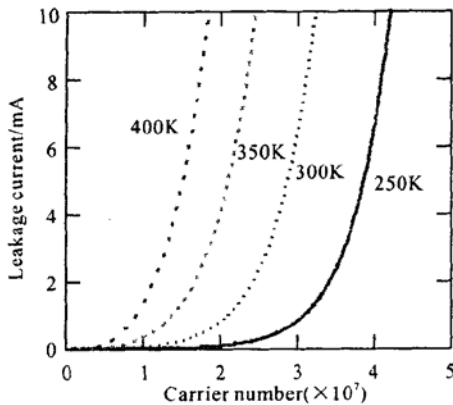


图 2 250~ 400 K 温度下,基于文献[10]中的 $d_0 \sim d_4$ 值的泄漏电流计算曲线

Fig. 2 Leakage current as calculated by [10] at temperatures from 250 to 400 K using $I_{l0} = 10$ A, $d_0 = 3574$, $d_1 = 2.25 \times 10^{-5}$, $d_2 = 10^{-7}$, $d_3 = 6.13 \times 10^9$

1.4 VCSEL 等效模型

正如前面提到的,载流子扩散和空间烧孔对

VCSEL 性能的影响小于热效应。为了简化模型,不妨忽略上述空间效应^[6],因此空间相关的速率方程(1),(2)式可变化为

$$\frac{dN}{dt} = \frac{\eta I}{q} - \frac{N}{\tau_n} - \frac{G(T)(N - N_t)S}{1 + \epsilon S} - \frac{I_l(N, T)}{q} \quad (7)$$

$$\frac{dS}{dt} = -\frac{S}{\tau_p} + \frac{\beta N}{\tau_n} + \frac{G(T)(N - N_t)S}{1 + \epsilon S} \quad (8)$$

其中 $G(T)$, N_t , I_l 分别由(4),(5),(6)式定义。激光输出功率 $P_o = kS$, 其中 k 为定标因子,表征 VCSEL 的输出耦合效率。

为了完成模型,仍然需要温度与 VCSEL 电流-电压特性的关系式。简便的方法是使用考虑了散热导致瞬态温度上升的热速率方程描述温度^[5]。基于这种考虑,采用以下表达式

$$T = T_0 + (IV - P_o)R_{th} - \tau_{th} \frac{dT}{dt} \quad (9)$$

这里 R_{th} 为 VCSEL 的热阻抗, τ_{th} 为热时间常数(一般为 $1 \mu s$ 量级), T_0 为环境温度, V 为激光器电压。在直流情况下, dT/dt 项消失,这里假设所有非光输出能量的损耗都转化为热。

同时,电流-电压 ($I-V$) 关系可以基于 VCSEL 的类似二极管特性来模拟。但为了表达方便,选择任意经验公式形式

$$V = f(I, T) \quad (10)$$

通过引入一个与这一电压并联的电容或其他寄生元件,可以模拟完整的 VCSEL 电特性(此时(9)式中 I 应改为通过包括寄生元件在内的整个器件的电流 I_{tot})。上述方法的优势是(10)式的具体形式能够基于不同器件选取。比如,在某些场合, $I-V$ 关系用一个电阻与一个二极管串联来描述最恰当

$$V = IR_s + V_T \ln \left[1 + \frac{I}{I_s} \right] \quad (11)$$

其中 R_s 为串行电阻, V_T 和 I_s 分别是二极管的热电压和饱和电流。在另一些场合,一个电流和温度的函数多项式可能更合适^[10]

$$V = (t_0 + t_1T + t_2T^2 + \dots) \cdot (i_0 + i_1I + i_2I^2 + \dots) \quad (12)$$

其中 $t_0 \sim t_2$ 和 $i_0 \sim i_2$ 都是常数。应该指出,对于不同 VCSEL 器件,这些常数将由实验所得不同温度下的 $I-V$ 数据拟合得到。也就是说,仿真前使用实验得到的 $I-V$ 曲线决定(10)式的具体形式和公式中的各常数值。这样做的好处是避开了复杂的物理机制分析,使用现有的经验公式形式和实际数据,更加准确地模拟器件特性。

作者的目的是建立一个可以在光电系统计算机辅助设计中使用的激光器模型, 因此尝试将这一模型运用到通用电路仿真器 (PSPICE) 中去, 以便 VCSEL 能与激光驱动器等其他电子器件结合起来进行电路级仿真。而 SPICE 模拟的实现依赖于将上述模型等式转变为等效子电路。

为了提高仿真时模型的收敛性, 特将 P_o 和 N 进行一些变换

$$P_o = (v_m + \delta)^2 \quad (13)$$

$$N = z_n v_n \quad (14)$$

这里 δ 和 z_n 为任意常数, 这样的处理使仿真器更加容易收敛得到正确的数值解^[8]。将 (13) 和 (14) 式代入 (7), (8) 式并经过适当处理, 得到如图 3 所示的等

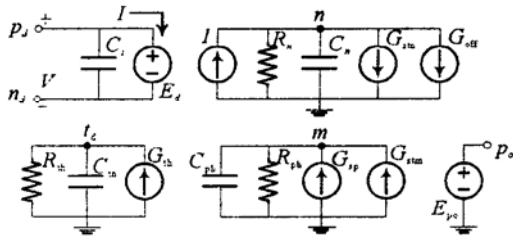


图 3 VCSEL 模型的等效子电路

Fig. 3 Equivalent-circuit representation of thermal VCSEL model

效子电路。图中 p_d 和 n_d 是 VCSEL 的电接口; p_o 是光学接口, 其结点电压模拟光输出功率 P_o ; 而 t_d 则是模拟器件温度 T 的结点。使用一个非线性电压源 E_d 来表征器件电特性, 其受控电压由 (10) 式决定。寄生漏电容的模型简化为一个与电压源并联的电容 C_l 。而温度方程 (9) 式模型由图中电阻 R_{th} , 电容 $C_{th} = \tau_{th}/R_{th}$, 以及非线性电流源 G_{th} 建立, 这里

$$G_{th} = \frac{T_0}{R_{th}} + (I_{tot} V - P_o) \quad (15)$$

其中 $I_{tot} = I + I_{C_l}$ 表示流经 VCSEL 的总电流, I_{C_l} 为经过 C_l 的电流。并且使用电容 $C_n = qz_n/\eta_i$, 电阻 $R_n = \eta_i\tau_n/(qz_n)$, 以及非线性电流源 G_{stm} 和 G_{off} 描述载流子速率方程 (7) 式。其中

$$G_{stm} = \frac{qG_0}{\eta_i k} \cdot \frac{a_0 + a_1 V_{td} + a_2 V_{td}^2}{b_0 + b_1 V_{td} + b_2 V_{td}^2} \cdot \frac{[z_n v_n - N_{t0}(c_0 + c_1 V_{td} + c_2 V_{td}^2)](v_m + \delta)^2}{1 + \varepsilon/k \cdot (v_m + \delta)^2} \quad (16)$$

$$G_{off} = \frac{I_{t0}}{\eta_i} \exp \left[\left(-d_0 + d_1 z_n v_n + d_2 z_n v_n V_{td} - \frac{d_3}{z_n v_n} \right) / V_{td} \right] \quad (17)$$

同时, 光子速率方程 (8) 式模型由图中电容 $C_{ph} =$

$2\tau_p$, 电阻 $R_{ph} = 1$, 以及电流源 G_{sp} 和 G_{stm} 构成的网络建立, 其中

$$G_{sp} = \frac{k\tau_p\beta z_n v_n}{\tau_n(v_m + \delta)} \quad (18)$$

$$G_{stm} = \frac{G_0\tau_p[z_n v_n - N_{t0}(c_0 + c_1 V_{td} + c_2 V_{td}^2)](v_m + \delta)}{1 + \varepsilon/k \cdot (v_m + \delta)^2} \cdot \frac{a_0 + a_1 V_{td} + a_2 V_{td}^2}{b_0 + b_1 V_{td} + b_2 V_{td}^2} - \delta \quad (19)$$

最后, E_{p_o} 将 v_m 转化为输出光功率 P_o 。

2 仿真与实验的对比

接下来将讨论模型在两个已由文献报道的不同 VCSEL 器件中的应用。第一个器件如 Crawford 等在文献 [11, 12] 中的报道, 是基于 AlGaInP 的 683nm 选择氧化限制 VCSEL, 面积为 $3 \mu\text{m} \times 3 \mu\text{m}$ 。该器件由压应变 InGaP 量子阱, AlGaInP 限制和覆盖层, 以及 AlGaAs DBR 层组成。文献中提供了环境温度在 60°C 范围内变化的 $L-I$ 和 $I-V$ 曲线。

利用 PSPICE 进行仿真的结果与实验曲线的对比由图 4 和 5 给出。可以看到, 在外界温度为 $25\sim 60^\circ\text{C}$ 范围内两者具有极好的一致性。但当温度更高时, 仿真结果可能过高估计器件的温度效应, 实际上在 85°C 时模型已经很难与实验数据匹配。高温下的这一差距应该由于模型中忽略空间相关性引起的。尽管存在局限性, 仍然可以确信上述模型在有效的器件运转条件下能够准确描述器件特性。

另一个器件是由 Thibeault 等在文献 [13] 中报道的 $3.1 \mu\text{m}$ 直径薄氧化孔径限制 VCSEL。该器

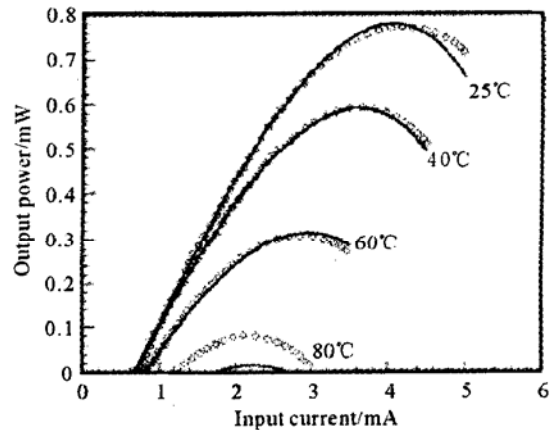


图 4 基于文献 [11, 12] 的仿真与实验 $L-I$ 曲线的对比
Fig. 4 Comparison of measured (data points) and simulated (lines) $L-I$ curves for VCSEL reported by reference [11, 12]

件由 $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$ -GaAs p 型 DBR 和 AlAs -GaAs n 型 DBR, 三个 $\text{In}_{0.17}\text{Ga}_{0.83}\text{As}$ -GaAs 量子阱, 以及 $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ 腔构成。文献给出了 23°C 下的 $L-I$ 实验曲线, 同时报道了 22°C 时 5 个不同偏置电流下的调制响应 (S_{21}), 因此也提供了验证上述模型交流小信号调制下的适应性的条件。

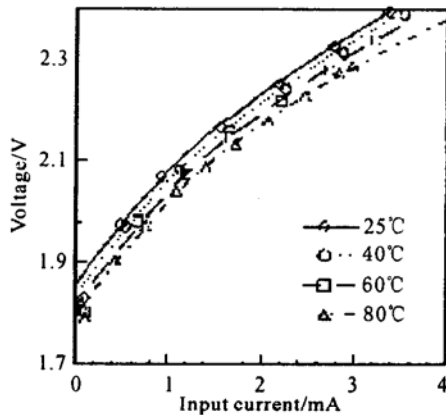


图 5 基于文献[11, 12]的仿真与实验 $I-V$ 曲线的对比
Fig. 5 Comparison of measured (data points) and simulated (lines) $I-V$ curves for VCSEL reported by reference [11, 12]

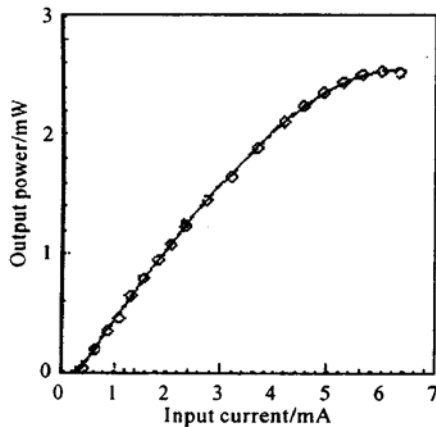


图 6 基于文献[13]的仿真与实验 $L-I$ 曲线的对比
Fig. 6 Comparison of measured (data points) and simulated (lines) $L-I$ curves for VCSEL reported by reference [13]

正如图 6 所示, 模拟与实验 $L-I$ 曲线吻合非常一致, 同样在 6 mA 附近出现热饱和下降。图 7 所示为 22°C 下在 0.5, 0.7, 1.0, 1.3 和 2.1 mA 偏置电流时的实验与模拟 S_{21} 数据对比, 可以看到两者具有良好的—致性。同时必须指出, 图 7 中的曲线是在电流低于饱和点以下获得的。在饱和点附近或超过饱和点, 由于缺乏真正的温度相关物理机制, 模型将很难正确模拟器件的小信号和瞬态特性。但是,

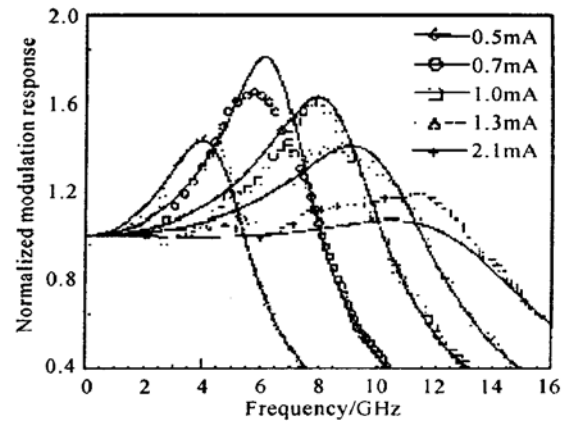


图 7 基于文献[13]的仿真与实验 S_{21} 曲线的对比
Fig. 7 Comparison of measured (data points) and simulated (lines) S_{21} curves for VCSEL reported by reference [13]

实际中 VCSEL 一般工作在饱和电流以下, 因此典型场合下模型对直流和交流运作都是有效的。

3 结 论

本文基于速率方程建立了一个考虑热效应的 VCSEL 模型。通过前面的比较可以说明, 将热效应用一种非常简单的方式建立模型并不会牺牲不同情况下模拟 VCSEL 实际运转特性的能力, 因此, 正如前面提到的, 这样的模型在光电系统设计和仿真中是非常实用的。使用 SPICE 内核的仿真器, 可以方便地将 VCSEL 与电子元件结合进行大型 EDA 设计。

参 考 文 献

- 1 W. Nakwaski, M. Osinski. Self-consistent thermal-electrical modeling of proton implanted top-surface-emitting semiconductor lasers [C]. *SPIE*, 1994, **2146**: 365~ 387
- 2 R. Michalzik, K. J. Ebeling. Modeling and design of proton-implanted ultralow-threshold vertical-cavity laser diodes [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1993, **29**(6): 1963~ 1974
- 3 G. R. Hadley, K. L. Lear, M. E. Warren *et al.*. Comprehensive numerical modeling of vertical-cavity surface emitting lasers [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1996, **32**(4): 607~ 616
- 4 J. Piprek, H. Wenzel, G. Sztefka. Modeling thermal effects on the light vs current characteristic of gain-guided vertical-cavity surface emitting lasers [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1994, **6**(2): 139~ 142
- 5 S. F. Yu, W. N. Wong, P. Shum *et al.*. Theoretical analysis of modulation response and second-order harmonic distortion in vertical cavity surface-emitting lasers [J].

- IEEE J. Quantum Electron.*, 1996, **32**(12): 2139~2147
- 6 Y. Su, Y. Chang, X. Chen. Circuit model for studying temperature effects on vertical-cavity surface emitting laser [C]. in Proc. IEEE LEOS Annu. Meeting, 1996, **1**: 215~216
- 7 K. Moriki, H. Nakahara, T. Hottori *et al.*. Single transverse mode condition of surface emitting injection lasers [J]. *Electron. Commun. Japan*, 1988, **71**(1, Part 2): 81~90
- 8 P. V. Mena, S.-M. Kang, T. A. DeTemple. Rate-equation-based laser models with a single solution regime [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(4): 717~730
- 9 G. Hasnain, K. Tai. L. Yang *et al.*. Performance of gain-guided surface emitting lasers with semiconductor distributed Bragg reflectors [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1991, **27**(6): 1377~1385
- 10 J. W. Scott, R. S. Geels, S. W. Corzine *et al.*. Modeling temperature effects and spatial hole burning to optimize vertical-cavity surface emitting laser performance [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1993, **29**(5): 1295~1308
- 11 M. H. Crawford, K. D. Choquette, H. Q. Hou *et al.*. Visible VCSELs: Recent advances and applications [C]. Proc. 1997 Digest LEOS Summer Topical Meetings—Vertical-Cavity Lasers, 1997. 17~18
- 12 M. H. Crawford, K. D. Choquette, R. J. Hickman *et al.*. InAlGaP vertical cavity surface emitting lasers (VCSEL's): Processing and performance [C]. Proc. Int. Conf. InP and Related Mater., 1997. 32~35
- 13 B. J. Thibeault, K. Bartilsson, E. R. Hegblom *et al.*. High-speed characteristics of low-optical loss oxide-apertured vertical-cavity lasers [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1997, **9**(1): 11~13

高功率中红外宽调谐全固态周期性极化铌酸锂光参量振荡器

中红外宽调谐激光器在激光光谱、拉曼光谱和大气污染探测、环保检测等领域有很多应用。目前主要采用光参量振荡(OPO)输出中红外激光。本实验采用主动调 Q 的全固态Nd:YVO₄激光器,输出波长为1064 nm的准连续激光抽运周期性极化铌酸锂(PPLN)晶体,实现OPO中红外激光输出。激光波长调谐范围为2.90~4.05 μm ,最高输出功率为276 mW,实验中同时输出波长范围为1.44~1.66 μm 的近红外激光。

实验装置采用外腔OPO(见图1),其抽运光源为LD抽运的Nd:YVO₄激光器,输出重复频率为16.2 kHz,脉宽为20.5 ns,平均功率为3.5 W的1064 nm准连续激光脉冲。OPO谐振腔参数由理论计算与优化得到, M_3, M_4 为平凹镜,其中 $R_3 = R_4 = 50$ mm,腔长约60 mm。PPLN晶体长度为20 mm,极化周期从28.2~30.8 μm 共14个周期。两个谐振腔之间用 $f = 50$ mm的平凸透镜对抽运光聚焦并实现模匹配。

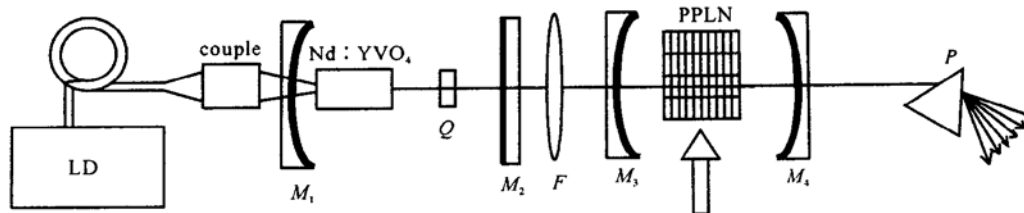


图1 实验装置

Fig.1 Experiment setup

¹ 中国科学院物理研究所, 北京 100080

² 山东师范大学物理系, 山东 济南 250014
林学春¹, 李瑞宁¹, 孔宇鹏¹, 张 瑛¹,
姚爱云¹, 崔大复¹, 许祖彦¹, 李 健²

收稿日期: 2003-02-17