文章编号：1000-7032(2009)04-0463-04

一种基于热补偿电流的大功率 VCSEL 模型

马 强[1,2]，田振华[1,2]，王贞福[1,2]，秦 莉[1]，宁永强[1*]
(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 激发态重点实验室，吉林 长春 130033； 2. 中国科学院 研究生院，北京 100049)

摘要： 基于激光速率方程并加入了热补偿电流，建立了一种用于分析大功率垂直腔面发射激光器(VCSELs)输出特性(*P-I*)的模型。先测得已知温度下的 *P-I* 特性，根据实验数据，利用阈值电流和温度的关系和 Gao 等人的方法得到 *a* 参数和其它参数。把所得参数代入模型，可以获得所需温度下的 *P-I* 特性。从模拟结果可以看出，不同温度下，模拟结果与实验结果吻合的非常好，而不考虑热补偿电流时差别很大，从而证明了该激光器模型的有效性；同时，从有源区温度和电流关系曲线可以看出，有源区随着电流增加温升很快，进一步证实了我们研究温度影响的重要性。

关 键 词： 速率方程；VCSELs；热模型
中图分类号： TN248.4 **PACS：** 42.55.Px **PACC：** 4255P **文献标识码：** A

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电子器件，引起了人们极大的关注，和传统的边发射激光器相比，VCSELs 具有阈值电流低、光束发散角小、单纵模工作、易于集成、成本低等特点。用于通信领域的 850 nm VCSELs 的研究已经很成熟。目前，有关 VCSELs 的研究主要集中在用于光纤通信的长波长范围，随着 VCSEL 芯片生长技术的不断进步，用于军事和工业加工的大功率 VCSEL 技术也正逐步成熟。

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。由于芯片的 DBR 层产生大量的热而它自身的散热性又非常差[1]，所以 VCSELs 的热效应比较严重，同时热效应会引起其它性能的恶化。例如，器件的空间温度效应引起的热聚焦现象会在直流和脉冲注入下产生很大的差别，甚至能改变激光的发射模式[2]。温度对器件最大的影响主要体现在其静态 *P-I* 特性上。首先，和边发射激光器一样，VCSELs 的阈值电流会随温度变化；其次，由于器件的温度随着注入电流的增大而上升，最终输出功率开始波动并下降[3]，从而限制了器件直流下的最大输出功率。

关于 VCSELs 温度模型，研究人员进行了相应的研究，这些模型可以较好地描述器件的温度特性，但他们基于数值分析，计算量大且不适合与其它电路一起进行仿真，尤其是在电路系统规模较大的情况下。目前，国内的计算模型都是针对小功率垂直腔面发射激光器，本文研究的重点是大功率垂直腔面发射激光器。我们在标准的激光速率方程基础上考虑温度对器件的影响建立了模型。为了方便起见，用温度的多项式来表达补偿电流，并把这项引入标准速率方程，从而得到一个普遍模型。把已知温度下的电流和功率代入该模型得到适用于该器件的系数，从而得到其它温度下的输出功率。

2 模型的建立

激光器工作在阈值电流以上时，输出功率与电流的关系(*P-I*)可用下式表示

$$P_o = \eta(T)[I - I_{th}(N,T)] \tag{1}$$

P_o 是器件输出功率，$\eta(T)$ 是与温度有关的微分斜率效率，I 是注入电流，$I_{th}(N,T)$ 是用载流子数目和有源区温度表示的阈值电流。假设和温度有

收稿日期： 2008-10-24；**修订日期：** 2009-05-07
基金项目： 国家自然科学基金(60636020，60876036，60676034，60706007)资金项目
作者简介： 马强(1982－)，男，辽宁丹东人，主要从事大功率 VCSELs 的研究。
E-mail：jlouluo@tom.com
*：通讯联系人；E-mail：ningyq@ciomp.ac.cn，Tel：(0431)86176348

关的微分斜率效率非常小,并且忽略空间烧孔效应[4],式(1)变成

$$P_o = \eta[I - I_{th}(T)] \tag{2}$$

而 $I_{th} = I_{th0} + I_{off}(T)$。其中 I_{th0} 是常温下的阈值电流,$I_{off}(T)$ 是用温度表示的补偿电流,为了方便起见,习惯上把 $I_{off}(T)$ 用下式表示

$$I_{off}(T) = a_0 + a_1T + a_2T^2 + a_3T^3 + a_4T^4 + \cdots \tag{3}$$

有源区温度与电流和电压的关系可以用下式表达[5,6]

$$T = T_0 + (IV - P_0)R_{th} - \tau_{th}\frac{dT}{dt} \tag{4}$$

T_0 是环境温度,R_{th} 是热阻,τ_{th} 是器件随温度的响应时间。

将式(1)~(4)代入标准速率方程

$$I = I_1 + bI_1^2 + \tau_{ns}\frac{dI_1}{dt} + C_s\frac{dV_j}{dt} + GS_n \tag{5}$$

$$GS_n + \beta(aI_1 + bI_1^2) = \frac{S_n}{R_P} + C_P\frac{dS_n}{dt} \tag{6}$$

得到考虑温度效应的速率方程

$$\frac{dN}{dt} = \frac{\eta_i[I - I_{off}(T)]}{q} - \frac{N}{\tau_n} - \frac{G_0(N - N_0)S}{1 + \varepsilon S} \tag{7}$$

$$\frac{dS}{dt} = -\frac{S}{\tau_p} + \frac{\beta N}{\tau_n} + \frac{G_0(N - N_0)S}{1 + \varepsilon S} \tag{8}$$

其中 S 是光子数,N 是载流子数,N_0 是透明载流子数,η_i 是注入效率,τ_n 是载流子复合寿命,G_0 是增益系数,τ_p 是光子寿命,β 是自发发射耦合效率。

为了验证模型的准确性,并进一步研究激光器的输出特性,我们把电压写成电流和温度的表达式

$$V = f(I,T) \tag{9}$$

为了便于计算,引入一个受温度影响的热电压 V_T,并用下式表示

$$V = IR_S + V_T\ln\left(1 + \frac{I}{I_S}\right) \tag{10}$$

其中 R_S 是串联电阻,I_S 是激光器的漏电流。同样,为了计算方便,我们把表达式(10)写成下面形式[3]

$$V = (b_0 + b_1T + b_2T^2 + \cdots)(c_0 + c_1I + c_2I^2 + \cdots) \tag{11}$$

$b_0 \sim b_n$ 和 $c_0 \sim c_n$ 是常数。由于通常只考虑与温度有关的特性,因此第一个多项式变成常数

$$V = d_0 + d_1I + d_2I^2 + \cdots \tag{12}$$

由公式(4)可以得到有源区温度随电流变化的关系,把式(3)~(12)带入式(2)中,可以得到器件的输出功率。

3 芯片的结构

我们使用的器件输出光波长为980 nm,出光窗口直径600 μm,其结构如图1所示。外延片由MOCVD生长,p面DBR是由30对 $Al_{0.9}Ga_{0.1}As$/GaAs组成,提供99.9%的反射率。为了减少串联电阻,采用碳做p型掺杂剂以减少电压降而不带来吸收损耗。30 nm厚的AlAs层作为氧化限制层。n面DBR采用Si掺杂,20个周期提供99.3%的反射率。有源区由三个8 nm厚的 $In_{0.2}Ga_{0.8}As$ 量子阱组成。

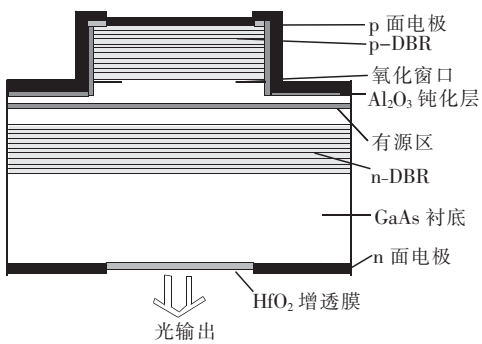

图1 底发射VCSEL结构图

Fig. 1 Structure of bottom-emitting VCSEL

4 实验与仿真

我们先用综合参数测试仪测量25,50,60,80 ℃下的 P-I 曲线。由图2可见,注入电流较小时,输出的光功率随注入电流的增加几乎是线性增长的,注入电流增大时,VCSELs内部的温度升高。由分析可知,漏电流也在增大,从而出现阈值电流随温度升高而增大,而输出光功率滚降的现象。环境温度为25 ℃,注入电流为6 A时功率开始出现饱和的趋势,当温度达到80 ℃时,注入电流接近5 A开始出现滚降现象,环境温度为80 ℃的阈值电流比环境温度为25 ℃时的阈值电流增加了30%。

参数提取分两步进行:首先提取描述温度特性的参数 a_0, a_1, a_2, a_3, a_4,利用器件 P-I 曲线得到不同温度下的阈值电流,从而拟合出阈值电流和

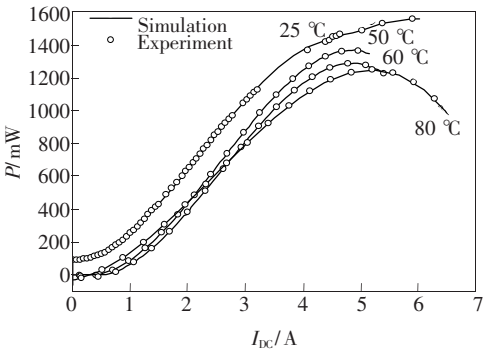

图 2　不同温度下 *P-I* 特性模拟与测量的比较曲线

Fig. 2　Comparison of the simulated and the measured output power

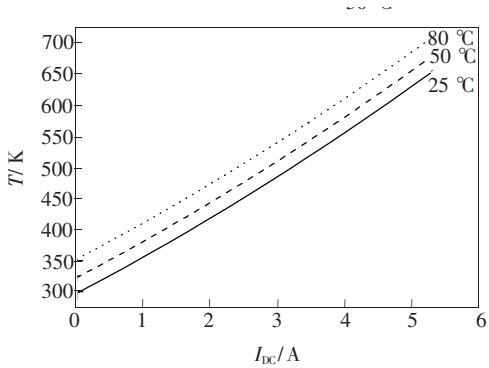

图 3　不同环境温度下有源区温度随电流变化曲线

Fig. 3　Analysis of the active region temperature increase with current at different ambient temperature

温度关系，得到 a 参数。其它参数用 Gao 等[7~9]的方法提取，得到的具体参数如表 1 所示。用表 1 的参数模拟 25，50，60，80 ℃环境温度下的 *P-I* 特性（图 2），模拟结果与实验结果吻合的非常好。

表 1　VCSEL 的温度模型参数

Table 1　Model parameters of our VCSEL

Parameters	Values	Parameters	Values
η_i	1	a_2 (A/K^2)	8.56×10^{-5}
β	1×10^{-6}	a_3 (A/K^3)	-1.24×10^{-8}
τ_n (s)	5×10^{-9}	a_4 (A/K^4)	9.4×10^{-12}
τ_p (s)	2.23×10^{-12}	R_{th} (℃/W)	30
a_0 (A)	0.69	τ_{th} (s)	1×10^{-6}
a_1 (A/K)	-5.05×10^{-2}	T_0 (℃)	25

根据公式（4）和器件的 *P-I* 特性，得到不同电流下有源区的温度随电流变化的曲线。从图 3 可以看出，有源区温度随着电流增大升高的很快，从而使光功率出现滚降现象，影响器件正常工作，这也说明了我们要考虑温度影响的重要性。

将所得参数带入模型，模拟 100 ℃时的 *P-I* 特性，结果见图 4。从图 4 可以看出，考虑热补偿电流时，测量结果与模拟结果吻合的非常好，而不考虑热补偿电流时，测量结果与模拟结果相差很大，充分说明了热效应对器件输出功率的影响以及模型的有效性。

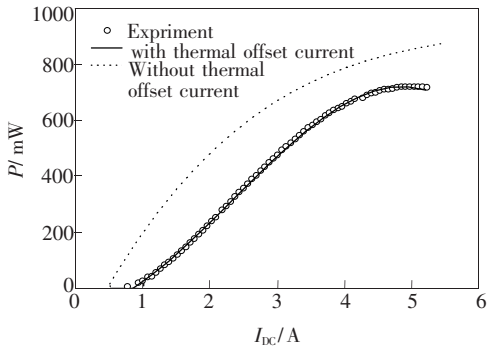

图 4　对 *P*，*I* 的测量数据与考虑及不考虑热补偿电流的模拟数据的比较

Fig. 4　Comparison of the measured and simulated data of *P* and *I*, with and without thermal offset current

5　结　　论

考虑了温度对输出功率的影响，在标准的激光速率方程基础上考虑温度对器件的影响建立了分析模型。先用测得已知环境温度下的 *P-I* 特性，经过计算得到模型里的系数，带入模型模拟得到所需温度下的 *P-I* 特性。通过此模型，我们可以更简单的确定器件在各温度下的工作状况，避免由于温度过高而带来的负面影响。

参　考　文　献：

[1] Sale T E, Roberts J S, David J P R, *et al.* Temperature effects in VCSELs [J]. *SPIE*, 1997, **3003**:100-110.

[2] Hasnain G, Tai K, Cho A Y. Performance of gain-guided surface emitting lasers with semiconductor distributed Bragg reflectors [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1991, **27**(6):1377-1385.

[3] Scott J W, Geels R S, Coldren L A. 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.

[4] Byrne D M, Keating B A. A laser diode model based on temperature dependent rate equations [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1989, **35**(1):356-359.

[5] Yu S F, Wong W N, Shum P, *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] Bewtra N, Suda D A, Tan G L, *et al*. Modeling of quantum-well lasers with electro-opto-thermal interaction [J]. *IEEE J. Select. Topics Quantum Electron.*, 1995, **1**(2):331-340.

[7] Mena P V, Morikuni J J, Kang S M A, *et al*. Simple rate- equation-based thermal VCSEL model [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1999, **17**(5):865-872.

[8] Zhu N H, Chen C, Pun E Y B, *et al*. Extraction of intrinsic response from S-parameters of laser diodes [J]. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 2005, **17**(4):744-746.

[9] Gao Jianjun, Li Xiuping, Flucke J, *et al*. Direct parameter-extraction method for laser diode rate-equation model [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2004, **22**(6):1604-1609.

A Theoretical Model of High Power VCSEL Based on the Thermal-offset-current

MA Qiang[1,2], TIAN Zhen-hua[1,2], WANG Zhen-fu[1,2], QIN Li[1], NING Yong-qiang[1]

(1. *Key Laboratory of Excited State Processes, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Science, Changchun* 130033, *China*;

2. *Graduate School of Chinese Academy of Science, Beijing* 100049, *China*)

Abstract: Vertical cavity surface emitting lasers (VCSEL's) are widely used in optical communication due to their single-longitudinal-mode operation, circular output beams, suitability for monolithic two-dimensional (2-D) integration, and compatibility with on-wafer probe testing. In recent years high power output has been realized by increasing the size of the emission window or by high densely integrating VCSEL array. Accompanying the increase of the output power, the performances such as temperature stability, conversion efficiency, and mode distribution are often deteriorated by the non-uniform distribution of carriers across the active region and the self-heating inside the device.

Self-heating results in considerable differences between the operating performances under continuous wave and pulsed operation. Thermal roll-over of the output power with current is observed under continuous wave, which limits on the further increase of lasing power.

A theoretical model based on laser rate equation is presented to simulate the output performance of high power VCSEL. In this simulation, thermal offset current is introduced to compensate the threshold current between room temperature and operating current. Thermal characteristics parameter is obtained from the dependence of the output power on the current at different temperature. Other parameters are extracted using the method of Gao *et al*. The dependence of P and I at certain ambient temperature was calculated according to the model parameters, and it shows a good consistent between the theoretical and the experimental results in the temperature range from room temperature to 100 ℃. In addition, the relationship between temperature and current indicates sever temperature increase in the active region.

Key words: rate equations; VCSEL; thermal model

CLC number: TN284.4 **PACS**: 42.55.Px **PACC**: 4255P **Document code**: A

Received date: 2008-10-24