

文章编号: 0258-7025(2010)01-0087-05

980 nm 垂直腔面发射激光器的变温输出特性

梁雪梅^{1,2} 王 烨^{1,2} 秦 莉¹ 李 特^{1,2} 宁永强¹ 王立军¹

(¹ 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所激发态物理重点实验室, 吉林 长春 130033)
² 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要 为了研究温度对 980 nm 垂直腔面发射激光器 (VCSEL) 输出特性的影响, 理论计算模拟了温度为 365 K 和 400 K 时 980 nm VCSEL 的功率-电流特性 ($P-I$) 曲线, 计算了器件的特征温度。实验结果验证了理论计算结果, 依据实验结果分析了温度变化对器件输出特性的影响。

关键词 半导体激光器; 垂直腔面发射激光器; 特征温度; 温度变化; 输出特性

中图分类号 TN248.4 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20103701.0087

980 nm Vertical Cavity Surface Emitting Laser Temperature-Change Output Characteristics

Liang Xuemei^{1,2} Wang Ye^{1,2} Qin Li¹ Li Te^{1,2} Ning Yongqiang¹ Wang Lijun¹

(¹ Key Laboratory of Excited State Processes, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China
² Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract In order to study the effects of the temperature changes on 980 nm vertical cavity surface emitting laser (VCSEL) output characteristics, power-current ($P-I$) curves of 980 nm VCSEL under two temperature conditions (365 K and 400 K) were simulated, characteristic temperature of this device was calculated. The effects of the temperature changes on output characteristic were analyzed according to the experimental results, which authenticated the theoretical calculation result.

Key words semiconductor lasers; vertical cavity surface emitting laser; characteristic temperature; temperature change; output characteristics

1 引 言

在当今的光电子研究领域中, 垂直腔面发射激光器 (VCSEL) 已经成为热门的研究方向之一。VCSEL 的独特几何构造使其较多的激光特性优于传统的边发射半导体激光器, 如较低的阈值电流、单纵模、圆形的输出光束以及便于二维集成等。这些显著的优点使 VCSEL 成为光通信、光互联、光存储及光抽运的理想光源^[1~4]。

VCSEL 是以量子阱为增益介质的半导体激光器。尽管量子阱激光器的阈值电流对温度的依赖性

与一般半导体激光器相比相对较弱, 但是有源区中结温度的增加对半导体激光器的可靠性和输出特性仍有着很强的影响。因此, VCSEL 与其他的半导体激光器一样也面临热效应问题^[5]。1988 年实现室温脉冲工作的 VCSEL 器件的阈值电流比相应的边发射器件大 30 倍, 高的阈值电流会引起更强的发热, 这是早期面发射激光器迟迟不能实现室温连续工作的原因之一^[6]。随着器件结构的不断改进, 阈值电流逐渐降低, 特别是有源区采用应变量子阱之后, 使得阈值电流进一步下降, 但对高功率和某些波

收稿日期: 2009-01-05; 收到修改稿日期: 2009-04-16

基金项目: 国家自然科学基金 (60577003, 60636020, 60676034, 60706007) 和中国科学院知识创新工程领域前沿项目资助课题。

作者简介: 梁雪梅 (1982—), 女, 博士研究生, 主要从事半导体激光器件的设计与实验工作。

E-mail: liangxuemei1026@hotmail.com, qinlicomp@yahoo.com.cn

导师简介: 王立军 (1946—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事半导体激光器的研究工作。E-mail: wanglj@ciomp.ac.cn

段 VCSEL 来说,仍比相应的边发射量子阱激光器的阈值高很多,因此发热问题仍然很严重^[7]。当 VCSEL 在室温连续工作状态时,器件内部多余的热量会造成器件内部温度升高,并阻碍输出功率的进一步提高。而温度的升高会引起折射率的增加,禁带宽度变窄,使激射波长向长波长方向移动,阈值电流增加。

VCSEL 的发热也是发展高密度二维阵列的主要障碍^[3]。有源区内部的热功率密度很高,从而使器件温度升高并导致阈值电流密度的进一步升高。而且,由于 VCSEL 具有二维的电流扩展和更为复杂的热源,其有源区温度在室温连续工作状态下,估计比衬底温度高 20~30 ℃;相反,在边发射器件中,有源区的温度升高在 2~5 ℃ 之间。可见在二维阵列中,实现有效的热扩散是非常必要的,而且器件的寿命随温度的升高而下降。目前,有些结构的 VCSEL 的许多性能参数都已经很好,而寿命问题却一直悬而未决,器件发热不能不说是主要原因之一。可见,VCSEL 的热特性对其工作特性的影响极大并直接关系到 VCSEL 的发展^[8]。

激光器的输出特性,尤其是工作温度是由特征温度所决定的。相关的物理机制包括对温度的依赖性、载流子的密度也应加以考虑。阈值电流的温度敏感性随着温度的升高而增加。因此,对 VCSEL 的特征温度作深入的研究是有必要的。

本文以直径为 600 μm 的底发射 VCSEL(所谓底发射 VCSEL 是指激光从衬底方向出射的一种垂直腔面发射激光器)为例,研究了温度变化对器件输出特性的影响。

2 理论模型

2.1 器件结构

图 1 所示为底发射 VCSEL 的结构示意图。VCSEL 外延片采用金属氧化物化学气相沉积法(MOCVD)生长而成。有源区包括 1 个 7 nm 厚的 $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ 量子阱和 10 nm 厚的 GaAs 材料构成的势垒,激射波长约为 980 nm。有源区夹在 $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ 间隔层间,有源区及间隔层构成一个波长的谐振腔。P 型分布布拉格反射镜(DBR)由 30 对 $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}/\text{GaAs}$ 构成,反射谱中心波长为 980 nm,理论上达到 99.9% 的反射率。为降低覆盖层的串联电阻,P 面掺 C(原子浓度为 $1 \times 10^{18}/\text{cm}^3$) 以减少电压降,同时不会增加吸收损耗。N 型 DBR 包括 28 对 Si(原子浓度为 $2 \times 10^{18}/\text{cm}^3$) 掺杂的 $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}/$

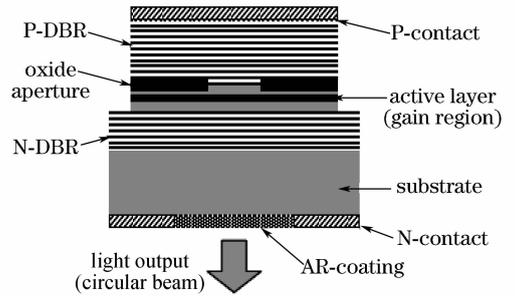


图 1 底发射 VCSEL 结构示意图

Fig. 1 Structural sketch of bottom-emitting VCSEL

GaAs, 提供 99.3% 的反射率。在 P 型 DBR 与间隔层之间有一 30 nm 厚的 AlAs 层,这一层经选择氧化后变成低折射率的坚固的隔离氧化物 Al_xO_y , 形成由氧化物包围的窗口,这样就可以减少横向电流扩展效应,产生对有源层的高效电流限制^[9]。

2.2 理论计算

描述半导体激光器电特性的基本方程是泊松方程

$$\nabla \cdot (\epsilon \nabla V) = -q(p - n + N_D - N_A) \quad (1)$$

及电子与空穴电流密度连续性方程

$$\nabla \cdot \mathbf{J}_n = q(R - G), \quad (2)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{J}_p = q(R - G), \quad (3)$$

式中 ϵ 为与空间相关的介质介电常数, V 为空间静电势, q 为电子电荷, n 为电子浓度, p 为空穴浓度。 N_D 为离化的施主浓度, N_A 为离化的受主浓度。 J_n 和 J_p 分别为电子和空穴的载流子流量密度。(2),(3) 式没有考虑时间的影响, R 和 G 分别为静复合率和静产生率。

半导体激光器中的光行为由波动方程和光子速率方程描述。TE 模的波动方程为

$$[\nabla^2 + \epsilon(x, y)k_0^2 - \beta^2] \cdot \mathbf{E}(x, y) = 0, \quad (4)$$

式中 $\epsilon(x, y)$ 为介电常数, $k_0 = 2\pi/\lambda_0$ (λ_0 为激射波长), β 为模式传播常数, $\mathbf{E}(x, y)$ 为光场。在平衡条件下,光子速率方程可以简化为

$$G_m = \alpha, \quad (5)$$

式中 G_m 为净模式增益, α 为镜面损耗、光子吸收损耗及其他内在损耗之和。

为了描述整个激光器的行为,模式输出功率是一个重要的参数

$$P = \frac{1}{2} \frac{c^2}{n\lambda} \frac{1}{L} \ln\left(\frac{1}{R_1 R_2}\right) \Sigma N_p, \quad (6)$$

式中 \bar{n} 为有源区材料折射率, L 为激光器腔长, R_1 和 R_2 为 DBR 的镜面反射率, N_p 为第 p 个模式在腔内的光子数。

基于上述的电特性方程和光特性方程,利用有限元方法搭建了 VCSEL 温度特性的计算模块。通过建立材料库,对光功率密度、中心波长、阈值范围、扫描步长、计算精度等参量的设置,计算了器件的 $P-I$ 输出特性,如图 2 所示。

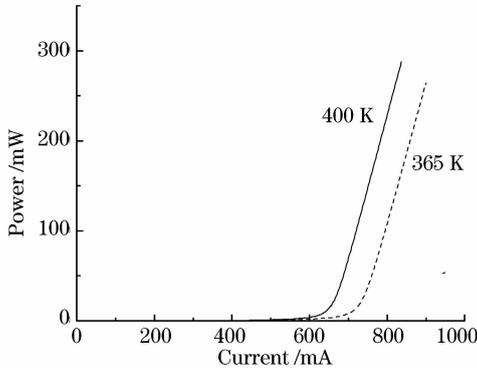


图 2 理论计算的 $P-I$ 特性曲线

Fig. 2 Theoretical results of $P-I$ output characteristics

特征温度 T_0 是由在不同温度 T_1 和 T_2 条件下所得到的阈值电流 I_1 和 I_2 确定的

$$T_0 = (T_2 - T_1) / [\ln(I_2) - \ln(I_1)]. \quad (7)$$

如图 2 所示, $P-I$ 特性曲线线性不是很好,对于这种线性不是很好的曲线,有 4 种方法可用来计算激光器阈值电流:1) 线性拟合;2) 两段拟合;3) $P-I$ 特性曲线一阶微分;4) $P-I$ 特性曲线二阶微分。根据 4 种方法测得的阈值电流,应该说都与实际值存在差异,但每种方法的结果相差都不大(相差都不超过 2%),考虑到方法的易行性,采用了线性拟合的方法计算阈值电流。即在线性较好的部分取两个点,计算出斜率,画出直线,该直线与横轴交点即为阈值电流,因此 $I_1 = 654$ mA, $I_2 = 728$ mA, 而 $T_1 = 365$ K, $T_2 = 400$ K, 根据(7)式计算得到 980 nm VCSEL 的特征温度为 327 K。

3 实验结果与讨论

实验中采用的 VCSEL 变温测试原理如图 3 所示。温控装置由人工智能工业调节器 AI-708P, 加热片, 铜热沉片, 支架, 220 V 电源, 散热片, 风扇以及热电偶 WRNK-112 组成。其中 AI-708P 的温度分辨率可达 0.5 °C, 它的核心部件为固态继电器。

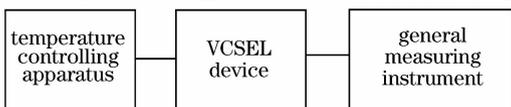


图 3 变温测试原理图

Fig. 3 Schematic diagram of temperature-change testing

铜热沉片通过加热片来加热升温,加热片的面积为 40 mm×40 mm,它的工作电压为交流 220 V,可把相同面积的铜热沉片加热到 150 °C。热电偶的测量范围为 0~1200 °C,分度号为 K,它用来探测铜的温度,然后把探测信号传给 AI-708P, AI-708P 通过固态继电器对电路进行快速的通断,达到控制温度的目的。铜热沉的散热是通过散热片和风扇进行的。

把 VCSEL 器件装在铜热沉上,由于铜具有良好的热导率,所以铜热沉的温度近似为 VCSEL 的工作温度。用综合参数测试仪对 VCSEL 进行测试。

采用直流电流注入方式对 980 nm VCSEL 进行了变温测试。图 4 为实验测得的在 110 °C 和 120 °C 时,输出功率和注入电流的关系。如图 4 所示, $T_1 = 383$ K, $T_2 = 393$ K, $I_1 = 845$ mA, $I_2 = 869$ mA, 根据(7)式算出 980 nm VCSEL 的特征温度为 357 K(84 °C)。考虑到 VCSEL 的制作工艺复杂,如果有一个步骤不够精细,便会使器件的输出特性与理论设计的结果产生偏差,虽然阈值电流比理论计算值高大约 200 mA,但特征温度的实验结果可以说是较好地验证了理论计算值。

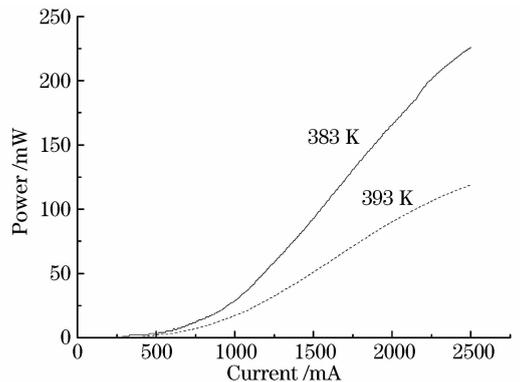


图 4 $P-I$ 特性曲线的实验结果

Fig. 4 Experimental results of $P-I$ output characteristics

图 5 为实验测得的阈值电流随温度的变化($I_{th}-T$ 输出特性)。当温度从室温升至 80 °C 时,器件的阈值电流由 1445 mA 减少到 694 mA;当温度继续升高到 120 °C 的过程中,阈值电流开始增加,当器件工作温度达到 120 °C 时,阈值电流增加到 869 mA。VCSEL 的阈值电流随着温度的升高先减小后增加,不是一个单调过程。这是 VCSEL 的阈值电流随温度变化的典型特性,这一点与边发射器件明显不同。边发射半导体激光器的阈值电流是随着温度的降低单调减小的,这是因为边发射激光器的腔长较长,能够产生谐振的波长范围较大,这就使器件的激光波

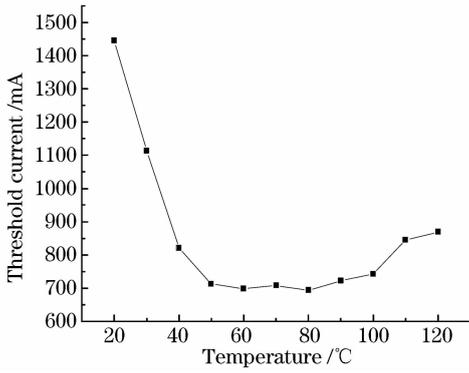


图 5 阈值电流随温度变化的实验结果

Fig. 5 Experimental result of $I_{th}-T$ output characteristics

长(λ_R)与有源区的增益波长(λ_P)能够时刻保持一致。所以,在边发射激光器中,阈值电流随着温度的降低而减小,同时,器件内部的光增益会得到提高。但在 VCSEL 中,由于 $\partial\lambda_R/\partial T < \partial\lambda_P/\partial T$,所以温度发生改变时, λ_R 与 λ_P 会出现失配现象^[10]。 $\lambda_R = \lambda_P$ 是获得最小阈值电流的条件之一,为了能在保持 $\lambda_R = \lambda_P$ 的条件下,使 VCSEL 器件工作在理想的温度情况,应该在设计器件时,选择适当的 λ_R 和 λ_P 的值。

图 6 为实验测得的器件输出功率随温度的变化 ($P-T$ 输出特性)。与阈值电流相反,输出功率随着温度的升高先增加后减小,在工作电流为 2.5 A,温度升到 50 °C 时,输出功率达到最大值 0.26 W。这与半导体边发射器件的变化趋势是有区别的。可见器件的输出光功率随温度并不是简单的下降关系,是复杂的指数变化关系。至于输出光功率随温度的变化在 50 °C 达到最大值,随着温度的继续升高,输出光功率随之下降。可能的原因是器件的腔模位置和量子阱增益谱的峰值正好重合在一点,从而达到了输出功率的最大值。随着温度的继续升高,腔模位置和量子阱增益谱的峰值不再重合,而吸收损耗增大,所以输出光功率开始下降^[11]。由于转换效率与

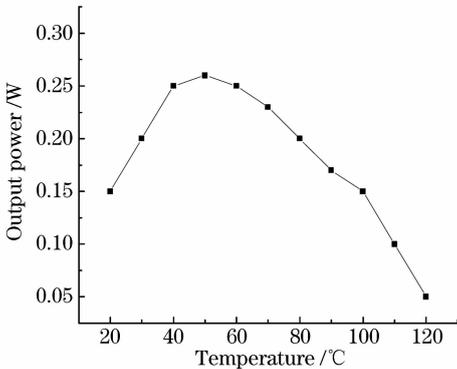


图 6 输出功率随温度变化的实验结果

Fig. 6 Experimental result of $P-T$ output characteristics

输出光功率成正比,所以转换效率的变化与输出光功率的变化大致相同。图 7 为实验测得的转换效率与温度的关系 (E_p-T 输出特性)。

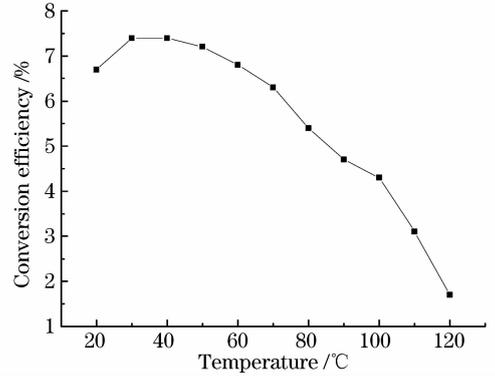


图 7 转换效率随温度变化的实验结果

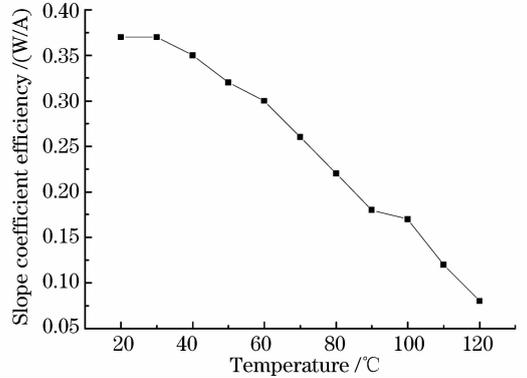
Fig. 7 Experimental result of E_p-T output characteristics

图 8 斜率效率随温度变化的实验结果

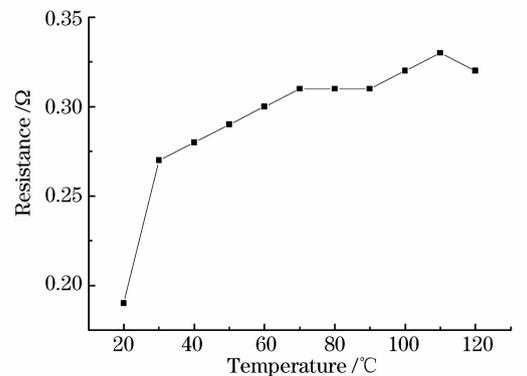
Fig. 8 Experimental result of E_s-T output characteristics

图 9 电阻随温度变化的实验结果

Fig. 9 Experimental result of R_d-T output characteristics

图 8 为实验测得的斜率效率与温度的关系 (E_s-T 输出特性)。随着温度的升高,斜率效率呈逐渐减少的趋势。图 9 为测量的电阻与温度的关系 (R_d-T 输出特性)。随着温度的升高,电阻呈逐渐增大的趋势。

图 10 为器件波长随温度变化的实验值 ($\lambda-T$ 输

出特性),随着器件本身温度的升高,VCSEL 的激光波长在逐渐地红移,红移速率大约为 $0.07 \text{ nm}/^\circ\text{C}$,而边发射激光器的红移速率大约为 $0.26 \text{ nm}/^\circ\text{C}$;相比而言,VCSEL 的波长红移速率较边发射激光器小一个数量级,可见,温度对 VCSEL 波长漂移性的影响并不明显^[12]。

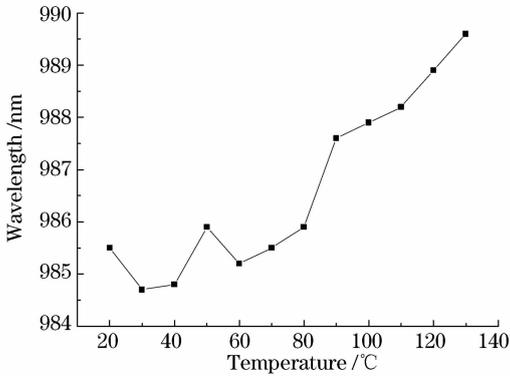


图 10 波长随温度变化的实验结果

Fig. 10 Experimental result of $\lambda-T$ output characteristics

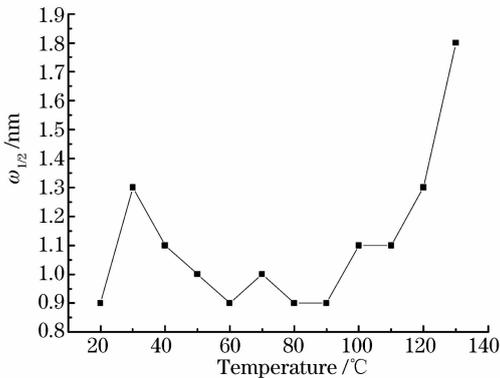


图 11 光谱半峰全宽随温度变化的实验结果

Fig. 11 Experimental result of $\omega_{1/2}-T$ output characteristics

图 11 是测量的光谱半峰全宽(FWHM, $\omega_{1/2}$)随温度的变化($\omega_{1/2}-T$ 输出特性)。与阈值电流相同,光谱半峰全宽随温度的升高呈现先减小后增加的变化趋势。当阈值电流最小即温度为 80°C 时, $\omega_{1/2}$ 也最小。

上述研究结果表明,980 nm VCSEL 在特征温度附近工作时,阈值电流最小,功率较高,光谱半峰全宽最小,说明特征温度是影响 VCSEL 性能的一个重要因素。

4 结 论

通过理论计算模拟了温度为 365 K 和 400 K 时

980 nm VCSEL 的 $P-I$ 曲线,计算了器件的特征温度。并利用实验结果验证了理论计算结果,分析了当温度发生变化时,器件的阈值电流、输出功率、转换效率、斜率效率、电阻、波长、光谱半峰全宽等输出特性所发生的改变及其所产生的原因。从以上的研究可以看到,温度变化是影响 VCSEL 性能的一个重要因素。因此,在设计和制作器件时,提高特征温度才能进一步改善 980 nm VCSEL 的性能。

参 考 文 献

- 1 Fang-I Lai, Tao-Hung Hsueh, Ya-Hsien Chang *et al.*. 10 Gb/s single-mode vertical-cavity surface-emitting laser with large aperture and oxygen implantation [J]. *Semicond. Sci. Technol.* 2004, **19**:L86~L89
- 2 Zhao Lumin, Wang Qing, Yan Changling *et al.*. 980 nm high power vertical cavity surface emitting laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(2):142~144
赵路民,王青,晏长岭等. 980 nm 高功率垂直腔面发射激光器[J]. *中国激光*, 2004, **31**(2):142~144
- 3 Stephan Hunziker, Sven Eitel, Karlheinz Gulden *et al.*. VCSEL arrays [C]. *SPIE*, 2001, **4286**:119~126
- 4 Ma Ying, Wang Cheng, Miao Tongqun. Blue light laser by direct frequency doubling of VCSEL [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2005, **13**(3):253~259
马莹,王成,缪同群. VCSEL 直接倍频蓝光固态激光器[J]. *光学精密工程*, 2005, **13**(3):253~259
- 5 W. Nakwaski, M. Osinski. Thermal properties of vertical-cavity surface-emitting semiconductor laser [J]. *Progress in Optics*, 1998, **38**:165~168
- 6 F. Koyama, S. Kinoshita, K. Iga *et al.*. Room temperature continuous wave lasing characteristics of GaAs vertical cavity surface-emitting lasers [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1989, **55**:221~223
- 7 K. D. Choquette, J. F. Klem, A. J. Fischer *et al.*. Room temperature continuous wave InGaAsN quantum well vertical-cavity lasers emitting at $1.3 \mu\text{m}$ [J]. *Electron. Lett.*, 2000, **36**(16):1388~1390
- 8 B. J. Piprek, T. Tröger. Thermal conductivity reduction in GaAs-AlAs distributed Bragg reflectors [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1998, **10**(1):81~83
- 9 W. W. Chow, K. D. Choquette, M. H. Crawford *et al.*. Design, fabrication, and performance of infrared and visible vertical-cavity surface-emitting lasers [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1997, **33**(10):1810~1824
- 10 Zou, D. L. Huffaker, D. G. Deppe. Ultralow threshold cryogenic vertical cavity surface emitting laser [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1999, **12**(1):1~3
- 11 M. Brunner, K. Gulden, R. Hovel *et al.*. Thermal lensing effects in small oxide confined vertical cavity surface emitting lasers [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2000, **76**(1):7~9
- 12 P. V. Mena, J. J. Morikuni, S. M. Kang *et al.*. A comprehensive circuit level model of vertical cavity surface emitting lasers [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1999, **17**(12):2612~2631