

文章编号:1001-9014(2010)06-0435-05

## 980nm 高功率垂直腔面发射激光器的理论分析

张星<sup>1,2</sup>, 宁永强<sup>1\*</sup>, 孙艳芳<sup>1</sup>, 张云翼<sup>2,3</sup>, 张岩<sup>1,2</sup>, 刘光裕<sup>1,2</sup>,  
史晶晶<sup>1,2</sup>, 王贞福<sup>1,2</sup>, 秦莉<sup>1</sup>, 刘云<sup>1</sup>, 王立军<sup>1</sup>

(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 100039;  
3. 中国科学院声学研究所, 北京 100080)

**摘要:**理论分析了980nm高功率垂直腔面发射激光器(VCSEL)的器件特性与其分布布拉格反射镜(DBR)反射率的依赖关系,并计算了具有不同有源区直径的VCSEL的输出特性.分析了具有不同有源区直径的VCSEL在不同DBR反射率条件下的连续输出特性曲线,发现DBR反射率的变化会对有源区直径不同的VCSEL产生不同程度的影响.为了验证理论分析的结果,进行了器件测试实验.实验结果表明,有源区直径为500 $\mu\text{m}$ 的VCSEL,当其N-DBR反射率分别为99.7%及99.2%时,在连续注入电流为6A时,其输出功率分别为2.01W和2.09W;而有源区直径为200 $\mu\text{m}$ 的VCSEL,当N-DBR反射率为99.7%及99.2%时,连续注入电流为3A时,其输出功率分别为0.64W及1.12W.器件测试结果有效验证了理论分析的结论.

**关键词:**半导体激光器;垂直腔面发射激光器;分布布拉格反射镜反射率  
**中图分类号:**TN248.4 **文献标识码:**A

## THEORETICAL ANALYSIS OF 980nm HIGH POWER VERTICAL-CAVITY SURFACE-EMITTING LASERS

ZHANG Xing<sup>1,2</sup>, NING Yong-Qiang<sup>1\*</sup>, Sun Yan-Fang<sup>1</sup>, Zhang Yun-Yi<sup>2,3</sup>,  
ZHANG Yan<sup>1,2</sup>, LIU Guang-Yu<sup>1,2</sup>, SHI Jing-Jing<sup>1,2</sup>, WANG Zhen-Fu<sup>1,2</sup>,  
QIN Li<sup>1</sup>, LIU Yun<sup>1</sup>, WANG Li-Jun<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Excited State Processes, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;  
2. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China;  
3. Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

**Abstract:** The dependency of the characteristics of 980nm high power vertical-cavity surface-emitting Lasers (VCSELs) on the distributed Bragg reflector (DBR) reflectivity was analyzed theoretically. The output characteristics of the VCSELs with different active region diameters were calculated. The output characteristics at different DBR reflectivities were analyzed. It is found that the variation of DBR reflectivity exerts different influences on the VCSELs with different diameters of active region. The test experiment was carried out in order to validate the theoretical analysis. The experimental results show that the output powers of VCSELs with 500- $\mu\text{m}$ -diameter active region under the injected current of 6A are 2.01W and 2.09W when the N-DBR reflectivities are 99.7% and 99.2%, respectively. However, the output powers of VCSELs with 200- $\mu\text{m}$ -diameter active region under the injected current of 3A are 0.64W and 1.12W when the N-DBR reflectivities are 99.7% and 99.2%, respectively. It was concluded that the theoretical results are validated by the experiment effectively.

**Key words:** semiconductor lasers; vertical-cavity surface-emitting laser (VCSEL); distributed Bragg reflector (DBR) reflectivity

收稿日期:2009-05-07,修回日期:2010-01-21

Received date: 2009-05-07, revised date: 2010-01-21

基金项目:国家自然科学基金(60636020,60706007,10974012,60876036,90923037,60676034);吉林省科技发展项目(20080335,20080516);中国科学院知识创新工程领域前沿项目资助项目

作者简介:张星(1983-),男,吉林辉南人,博士研究生,研究方向为新型半导体光电子器件,E-mail:zx3930@sina.com.

\*通信作者:ningyq@ciomp.ac.cn.

## 引言

垂直腔面发射激光器 (Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers, VCSELs) 作为一种新型半导体激光器, 具有许多独特优点<sup>[1~4]</sup>. VCSEL 能发出圆形对称光斑, 在泵浦光纤激光器及光纤放大器时具有更高的耦合效率, 因此在泵浦应用方面有较大潜力. 近年来国内外在研制泵浦用高功率 VCSEL 方面取得了一系列重要进展<sup>[5~7]</sup>.

进行高功率 VCSEL 结构设计时, 合理选择器件的材料参数及结构参数, 可以对器件性能进行优化. 本文对 980nm 高功率 VCSEL 进行了理论分析, 通过研究在不同有源区直径条件下其谐振腔镜面反射率对器件特性的影响, 探讨了在保持有源区结构不变的条件下优化器件性能的途径. 同时对器件输出特性进行了模拟, 将各种参数对器件输出特性的影响可视化. 最后对理论分析得出的结论进行了实验验证.

## 1 器件结构

980nm 高功率 VCSEL 的器件结构及谐振腔内部简图示于图 1.

980nm 高功率 VCSEL 通常采用图 1(a) 所示的底发射结构<sup>[6]</sup>. VCSEL 的谐振腔由生长在芯片上的 N 型分布布拉格反射镜 (N-DBR) 及 P 型 DBR (P-DBR) 组成, 其中 N-DBR 为输出镜. 图 1(b) 所示的 VCSEL 有源区是由多个厚度为  $\lambda/2n$  的周期性结构组成<sup>[4]</sup>的周期增益结构 (Periodic Gain Structure, PGS),  $\lambda$  为激光波长,  $n$  为谐振腔有效折射率. 采用图 1(a) 所示的 AlAs 氧化限制层来实现电流及光的横向限制, 有源区直径相当于氧化限制层的孔径大小.

## 2 理论模型

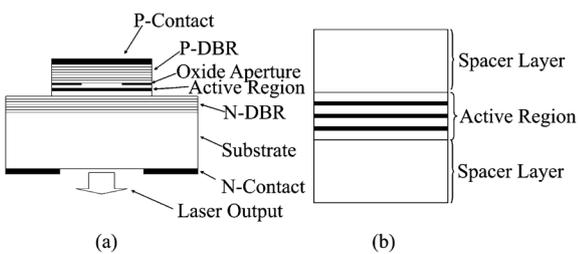


图 1 (a) 980nm 高功率 VCSEL 结构简图 (b) 谐振腔内部简图

Fig. 1 (a) Schematic illustration of a 980nm high power VCSEL (b) the internal structure of the resonant cavity

### 2.1 阈值增益及阈值电流

VCSEL 的阈值模式增益表示为

$$\Gamma g_{th} = \alpha_i + \alpha_m, \quad (1)$$

$\alpha_i$  是腔内吸收系数, 其中包含图 1(b) 所示有源区及间隔层内的光吸收;  $\alpha_m$  是镜面损耗项;  $\Gamma$  为纵模限制因子.

VCSEL 有源区中多量子阱及间隔层内的载流子密度随时间的变化关系为<sup>[8]</sup>

$$\begin{aligned} \frac{\partial M}{\partial t} &= \frac{J}{qn_w d_w} - \frac{M}{\tau_s} + \frac{d_w}{d_s} \frac{N}{\tau_{te}} \\ \frac{\partial N}{\partial t} &= \frac{d_s}{d_w} \frac{M}{\tau_s} - \frac{\tau_n + \tau_{te}}{\tau_n \tau_{te}} N - v_g g(N)_s, \end{aligned} \quad (2)$$

$J$  是注入电流面密度;  $q$  是电子电荷;  $n_w$  是量子阱阱数;  $d_s$  是间隔层厚度;  $\tau_s$  是双极载流子通过间隔层的渡越时间;  $\tau_n$  是量子阱中的载流子寿命;  $\tau_{te}$  是量子阱的热电子激发寿命;  $g(N)$  是光增益, 与注入有源区内的载流子浓度  $N$  有关;  $v_g$  是群速度;  $M$  和  $S$  分别是间隔层内的载流子浓度和谐振腔内的光子密度. 在阈值处有  $J = J_{th}$  及  $N = N_{th}$ ,  $J_{th}$  及  $N_{th}$  分别为阈值处的注入电流面密度及此时注入到有源区的载流子浓度. 在阈值处, 载流子浓度  $N$  被锁定, 此时有  $\partial M/\partial t = 0$  及  $\partial N/\partial t = 0$ , 由式 (2) 可以得到如下关系<sup>[9]</sup>:

$$\frac{J_{th}}{qn_w d_s} = \frac{1}{\tau_n} \frac{d_w}{d_s} N_{th}. \quad (3)$$

根据式 (1)、式 (3) 及量子阱激光器中载流子浓度与增益的经验关系<sup>[10]</sup> 可推出 VCSEL 的阈值电流表达式为

$$I_{th} = \frac{qA_s n_w d_w B N_{tr}^2}{\eta_i} \exp\left(\frac{2}{g_N \Gamma} [\alpha_i + \alpha_m]\right), \quad (4)$$

其中,  $B$  是双分子复合系数,  $\eta_i$  是内量子效率,  $g_N$  是材料增益常数,  $N_{tr}$  是透明载流子密度.

### 2.2 输出功率

VCSEL 通过 N-DBR 及 P-DBR 的总输出功率  $P$  与注入电流  $I$  的关系为<sup>[11]</sup>

$$P = \eta_i \frac{\alpha_m}{\alpha_i + \alpha_m} \frac{hv}{q} (I - I_{th}). \quad (5)$$

由于 VCSEL 的 DBR 反射镜存在损耗, 因此有  $R_1 + T_1 \neq 1$  及  $R_2 + T_2 \neq 1$ , 其中  $T_1$ 、 $T_2$  分别是 P-DBR 及 N-DBR 的透射率. 设由 DBR 损耗为  $L_{DBR}$ , 有  $T_2 = 1 - R_2 - L_{DBR}$ . 如果设 VCSEL 通过 N-DBR 输出功率为  $P_{out}$ , 在这种输出镜面存在额外损耗的情况下, 有如下关系成立<sup>[11]</sup>

$$F_2 = \frac{P_{\text{out}}}{P} = \frac{T_2}{(1-R_2) + \frac{\sqrt{R_2}}{\sqrt{R_1}}(1-R_1)}, \quad (6)$$

$F_2$  代表 VCSEL 通过 N-DBR 输出的功率与总输出功率的比值. 可以得到 VCSEL 通过 N-DBR 的输出功率的表达式为

$$P_{\text{out}} = F_2 \eta_i \frac{\alpha_m}{\alpha_i + \alpha_m} \frac{hv}{q} (I - I_{\text{th}}) \quad (7)$$

### 2.3 热效应

设 VCSEL 有源区即热源距离理想热沉的距离为  $h$ , 则器件热阻  $R_t$  定义为  $R_t = h/(\xi A)$ , 其中  $\xi$  为材料的热导率;  $A$  为热源区域的面积. 当  $R_t$  确定之后, 器件的温升  $\Delta T$  可以表示为  $\Delta T = R_t P_d$ , 其中  $P_d$  为电功率中除了转化为输出光功率外, 消耗在激光器本身的功率部分, 其表达式为:

$$P_d = P_{\text{in}} - P = I^2 R_d + IV_d + IV_s - P \quad (8)$$

其中,  $P_{\text{in}}$  是输入的总电功率,  $R_d$  是串联电阻,  $V_d$  是结电压,  $V_s$  是与电流无关的串联电压.

考虑热效应之后,  $P_{\text{out}}$  的表达式变为:

$$P_{\text{out}} = F_2 \eta_i \frac{\alpha_m}{\alpha_i + \alpha_m} \frac{hv}{q} (I - I_{\text{th}}) \left(1 - \frac{\Delta T}{T_{\text{off}}}\right) \quad (9)$$

其中,  $T_{\text{off}}$  为器件截止温升.

### 3 计算结果与讨论

根据第 2 部分中的理论模型, 可通过计算来确定 VCSEL 的材料及结构参数, 进行器件结构设计. 表 1 为计算中使用的激光器及材料的特性参数.

表 1 激光器及材料特性参数

Table 1 The characteristic parameters of the laser and material

参量	名称	数值	单位
$g_N$	材料增益常数	2000	$\text{cm}^{-1}$
$N_{\text{tr}}$	透明载流子浓度	$1.7 \times 10^{18}$	$\text{cm}^{-3}$
$d_w$	量子阱阱宽	6.0	nm
$\eta_i$	内量子效率	1	-
$\lambda$	激光波长	980	nm
$B$	双分子复合系数	$1.0 \times 10^{-10}$	$\text{cm}^3/\text{s}$
$R_1$	P-DBR 反射率	99.9%	-
$n$	有效折射率	3.4	-
$\alpha_i$	腔内吸收系数	10	$\text{cm}^{-1}$
$\Gamma$	纵模限制因子	0.12	-
$L_{\text{DBR}}$	DBR 吸收损耗	0.1%	-
$h$	P-DBR 厚度	5	$\mu\text{m}$
$R_d$	串联电阻	0.12	$\Omega$
$V_d$	结电压	1.265	V
$V_s$	串联电压	0.5	V
$T_{\text{off}}$	器件截止温升	140	K
$\xi$	GaAs 热导率	44	W/mK

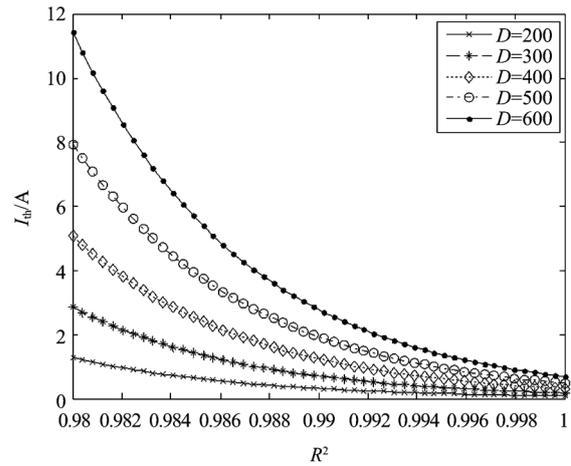


图 2 量子阱数为 3 时, 有源区直径  $D$  分别为 200、300、400、500、600  $\mu\text{m}$  时, VCSEL 的阈值电流  $I_{\text{th}}$  随 N-DBR 反射率  $R_2$  的变化关系

Fig. 2 The calculated relationship between the threshold current  $I_{\text{th}}$  and the N-DBR reflectivity  $R_2$  of the VCSEL when the number of quantum wells is 3, the values of  $D$  ( $\mu\text{m}$ ) are 200, 300, 400, 500 and 600, respectively

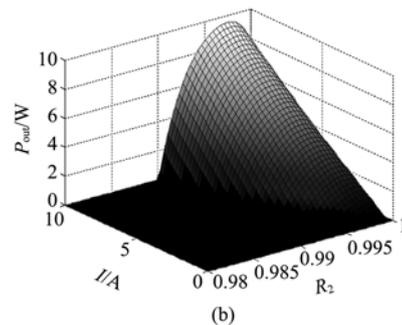
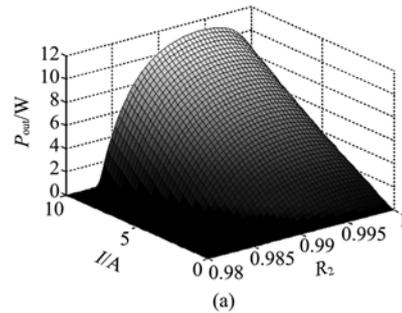


图 3 未考虑热效应影响时, 有源区直径  $D$  为 (a) 200  $\mu\text{m}$  (b) 500  $\mu\text{m}$  时 VCSEL 通过 N-DBR 输出功率  $P_2$  与 N-DBR 反射率  $R_2$  及注入电流  $I$  的变化关系

Fig. 3 The relationship between the injection current  $I$ , the output power  $P_2$  and the N-DBR reflectivity  $R_2$  of VCSEL, the diameter of the active region is (a) 200  $\mu\text{m}$  (b) 500  $\mu\text{m}$ , respectively

图 2 为量子阱数固定为 3 时, 根据式 (8) 计算得到的不同有源区直径条件下的  $I_{\text{th}}$  与 N-DBR 反射率的变化关系. 从图中可见, 有源区直径越大的 VC-

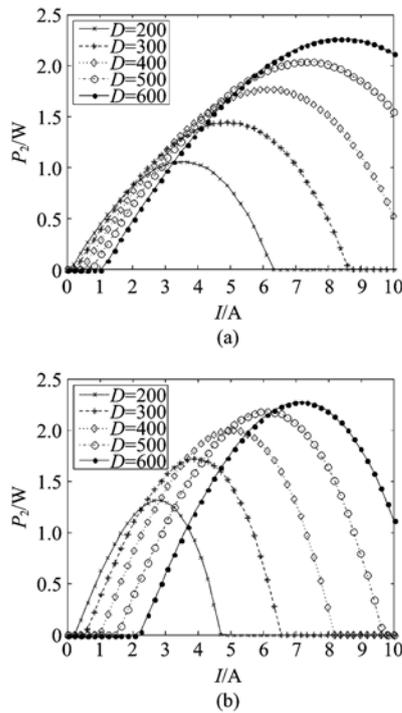


图4 考虑热效应影响时,N-DBR 反射率分别取 (a)99.7% (b)99.2% 时 VCSEL 通过 N-DBR 输出功率随注入电流  $I$  的变化关系

Fig.4 The influence of thermal effect was taken into account, the  $P$ - $I$  curve of the VCSEL when the N-DBR reflectivity equals to (a)99.7% (b)99.2%

SEL,其阈值电流提高的速度越快.

图3(a)、(b)为未考虑热效应影响时,计算得到有源区直径  $D$  分别为  $200\mu\text{m}$  及  $500\mu\text{m}$  时,VCSEL通过 N-DBR 输出功率  $P_{\text{out}}$  与 N-DBR 反射率  $R_2$  及注入电流  $I$  的变化关系.从图中可见,有源区直径为  $200\mu\text{m}$  的 VCSEL,输出特性可以在较大 N-DBR反射率范围内得到优化,而有源区直径为  $500\mu\text{m}$  的 VCSEL 则反之.

图4(a)、(b)为考虑器件热效应影响之后,计算得到的有源区直径  $D$  取不同值时,VCSEL 通过 N-DBR输出功率  $P_{\text{out}}$  在 N-DBR 反射率  $R_2$  分别为 99.7% 及 99.2% 时随电流的变化关系.从图中可见当 N-DBR 反射率由 99.7% 改变至 99.2% 时,有源区直径较大的器件的最高输出功率无明显变化,而有源区直径较小器件的最高输出功率有较大提高.可见有源区直径不同的 VCSEL 的输出特性随着 N-DBR的改变不尽相同.

#### 4 器件测试结果及讨论

为了进一步研究 N-DBR 反射率对 VCSEL 输出特性的影响,选择两种具有不同 N-DBR 反射率但有

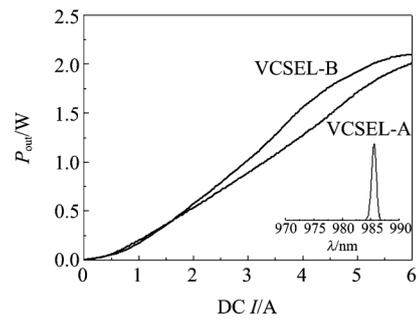


图5 有源区直径为  $500\mu\text{m}$ ,N-DBR 反射率分别为 99.7% (VCSEL-A) 及 99.2% (VCSEL-B) 的 VCSEL 输出特性曲线  
Fig.5 The  $P$ - $I$  curves of 980nm high power VCSEL's with a  $500\mu\text{m}$ -diameter active region, the N-DBR reflectivity of the VCSEL is 99.7% (VCSEL-A) and 99.2% (VCSEL-B) respectively

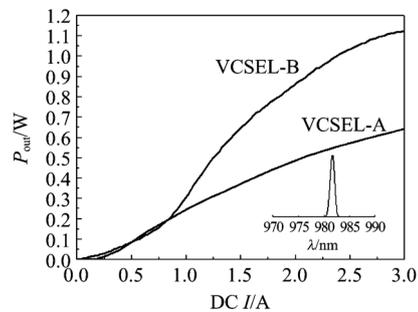


图6 有源区直径为  $200\mu\text{m}$ ,N-DBR 反射率分别为 99.7% (VCSEL-A) 及 99.2% (VCSEL-B) 的 980nm VCSEL 输出特性曲线  
Fig.6 The  $P$ - $I$  curves of 980nm VCSEL's with a  $200\mu\text{m}$ -diameter active region, the N-DBR reflectivity of the VCSEL is 99.7% (VCSEL-A) and 99.2% (VCSEL-B) respectively

源区结构相同的 VCSEL 器件进行测试.两种器件的 P-DBR 均包含 30.5 对 GaAs/AlAs,反射率超过 99.9%;N-DBR 分别包含 28.5 对以及 22.5 对 GaAs/AlAs,反射率分别为 99.7% 以及 99.2%.为简便起见,我们将这两种 N-DBR 反射率为 99.7% 及 99.2% 的 VCSEL 分别称为 VCSEL-A 及 VCSEL-B.

图5所示为有源区直径均为  $500\mu\text{m}$  的 VCSEL-A 及 VCSEL-B 的器件测试结果.VCSEL-A 的阈值电流为 0.5A,连续注入电流 6A 下的输出功率为 2.01W;VCSEL-B 的阈值电流为 0.83A,连续注入电流 6A 下的输出功率为 2.09W.

另一方面,测试了有源区直径均为  $200\mu\text{m}$  的 VCSEL-A 及 VCSEL-B.图6所示为测试结果,此时 VCSEL-A 的阈值电流为 0.2A,连续注入电流 3A 下的输出功率为 0.64W;VCSEL-B 的阈值电流为 0.5A,连续注入电流 3A 下的输出功率为 1.12W.

器件测试结果表明,当 VCSEL 的有源区直径不

同时,需要选择不同的 N-DBR 反射率才能使器件的输出特性得到优化. VCSEL-B 的 N-DBR 反射率较 VCSEL-A 有所下降,但当其有源区直径较小时具有更好的性能;VCSEL-A 的 N-DBR 反射率较高,适合制成有源区直径较大的器件.

## 5 结论

理论分析的结果表明,DBR 反射率的改变对不同有源区直径的 VCSEL 的阈值电流、输出功率等振荡特性参数会产生不同程度的影响. 因此针对有源区直径不同的 VCSEL 应采用不同的 DBR 反射率使其输出特性得到优化. 对具有不同 N-DBR 反射率的 VCSEL 进行的器件测试结果有效验证了该结论. 根据计算以及器件测试的结果可以预期,合理选择相应的器件结构参数同时采用性能更好的散热装置,能够使 980nm 高功率 VCSEL 的输出特性得到进一步优化.

## REFERENCES

- [1] Iga K, F Koyama, Kinoshita S. Surface emitting semiconductor lasers[J]. *IEEE J. Quantum Electronics*, 1988, **24**(9):1845—1855.
- [2] Raja M Y A, Brueck S R J, Osinski M, *et al.* Resonant periodic gain surface-emitting semiconductor lasers[J]. *IEEE J. Quantum Electronics*, 1989, **25**(6):1500—1512.

(上接 426 页)

研究,发现硒碲铅薄膜的折射率  $n$  在 5.2 到 5.8 之间,消光系数  $k$  均小于 0.1,其中 150℃ 衬底温度沉积的薄膜消光系数  $k$  在波长大于 6 $\mu\text{m}$  的红外光谱范围到达  $10^{-3}$  量级. 所得到的硒碲铅薄膜为多晶结构,晶粒呈矩形形状,薄膜的生长具有明显的择优取向.

## REFERENCES

- [1] Darrow M S, White W B, Roy R. Micro-indentation hardness variation as a function of composition for polycrystalline solutions in the systems PbS-PbTe, PbSe-PbTe and PbS-PbSe[J]. *Journal of Materials Science*, 1969, **4**(4), 313—

- [3] Chao-Kun L, Tandon A, Djordjev K, *et al.* High-speed 985nm bottom-emitting VCSEL arrays for chip-to-chip parallel optical interconnects[J]. *IEEE Selected Topics in Quantum Electronics*, 2007, **13**(5):1332—1339.
- [4] Corzine S W, Geels R S, Scott J W, *et al.* Design of Fabry-Perot surface-emitting lasers with a periodic gain structure[J]. *IEEE J. Quantum Electronics*, 1989, **25**(6):1513—1524.
- [5] Michalzik R, Grabherr M, Jaeger R, *et al.* Progress in high-power VCSELs and arrays[J]. *SPIE Optoelectronic Materials and Devices*, 1998, **3419**:187—195.
- [6] Jin Zhen-Hua, Sun Yan-Fang, Ning Yong-Qiang, *et al.* 980nm high power bottom emitting VCSELs[J]. *J. Infrared Millim. Waves*(金珍花,孙艳芳,宁永强,等.980nm 大功率垂直腔底发射激光器. *红外与毫米波学报*), 2005, **24**(1):61—64.
- [7] Seurin J-F, Ghosh C L, Khalfin V, *et al.* High-power vertical-cavity surface-emitting arrays[J]. *SPIE High-Power Diode Laser Technology and Applications VI*. 2008, **6876**:001—009.
- [8] Nagarajan R, Bowers J E. Effects of carrier transport on injection efficiency and wavelength chirping in quantum-well lasers[J]. *IEEE J. Quantum Electronics*, 1993, **29**(6):1601—1608.
- [9] Yu S F. *Analysis and design of vertical cavity surface emitting lasers*[M]. New York: Wiley 2003.
- [10] DeTemple T A, Herzinger C M. On the semiconductor laser logarithmic gain-current density relation[J]. *IEEE J. Quantum Electronics*, 1993, **29**(5):1246—1252.
- [11] Coldren L A, Corzine S W. *Diode lasers and photonic integrated circuits*[M]. New York: Wiley 1995.

319.

- [2] Li B, Jiang J C, Zhang S Y, *et al.* Low-temperature dependence of mid-infrared optical constants of lead germanium telluride thin film[J]. *J. Appl. Phys.* 2002, **91**(6):3556—3561.
- [3] Grimes D E. The Pb-PbTe-PbSe subternary system[J]. *Trans. Metal. Soc., AIME*, 1965, **233**(7):1442—1444.
- [4] Li B, Zhang S Y, Zhang F S, *et al.* Crystal structure, morphology, depth profile of elements and mid-infrared optical constants of ‘mild’ lead telluride film[J]. *Appl. Phys. A*. 2003, **76**(6):965—968.
- [5] Li B, Zhang S Y, Liu D Q, *et al.* Homogeneity of composition in evaporated  $\text{Pb}_{1-x}\text{Ge}_x\text{Te}$  thin films[J]. *Proceedings of the SPIE*, 2005, **5964**:275—279.