

增益-腔模失配型高温工作垂直腔面发射 半导体激光器

张建伟^{1,2} 宁永强¹ 张 星¹ 曾玉刚¹ 张 建^{1,2} 刘 云¹ 秦 莉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 发光学及应用国家重点实验室, 吉林 长春 130033)

² 中国科学院大学, 北京 100049

摘要 理论分析了温度对垂直腔面发射半导体激光器(VCSEL)工作性能的影响,利用 VCSEL 的增益-腔模失配理论设计了适用于高温环境下工作的 VCSEL 外延结构并对该结构进行了外延生长及工艺制备。理论分析表明,采用势垒高度大于 0.25 eV 的量子阱有源区结构可以缓解高温工作时器件的载流子泄漏问题。设计了室温下增益-腔模偏离为 11 nm 的器件结构。理论分析表明,在 320 K 时与器件腔模对应的增益谱波长具有最大的光增益,此时器件具有最小的阈值电流。对分布式布拉格反射镜(DBR)的反射率进行了优化以进一步减小器件阈值电流。采用了一种自平坦化的台面工艺结构制作了 7、9、13 μm 三种不同氧化口径的器件,器件在室温下的阈值电流分别为 1.95、2.53、2.9 mA,最大出光功率分别为 0.31、1.11、1.04 mW,并且输出功率的高温稳定性较好。随工作温度的升高,器件阈值电流先减小后变大,在 320~330 K 时器件阈值达到最小值,与理论分析一致。

关键词 激光器;垂直腔面发射半导体激光器;高温工作;增益-谐振腔腔模失配;自平坦化台面

中图分类号 TN248.4 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201340.0502001

Gain-Cavity Mode Detuning Vertical Cavity Surface Emitting Laser Operating at the High Temperature

Zhang Jianwei^{1,2} Ning Yongqiang¹ Zhang Xing¹ Zeng Yugang¹ Zhang Jian^{1,2}
Liu Yun¹ Qin Li¹ Wang Lijun¹

(¹ State Key Laboratory of Luminescence and Application, Changchun Institute of Optics,
Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China)

² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract The situation of vertical cavity surface emitting laser (VCSEL) operating at high temperature is analyzed theoretically, and the gain-cavity mode detuning characteristics is employed to design the epitaxy structure of VCSEL. The metal-organic chemical vapor deposition (MOCVD) growth and fabrication process are carried out. The barrier height above 0.25 eV is used in the active region of VCSEL to reduce the carrier leakage at high temperature. The designed structure employs the 11-nm gain-cavity mode deviation. The highest gain appears at about 320 K, at which the minimum threshold current of VCSEL appears. The reflectivity of distributed Bragg reflector (DBR) within VCSEL is designed to obtain the low threshold current. The self-planar mesa structure is employed to fabricate the VCSEL devices. VCSEL with oxide apertures of 7, 9, 13 μm are fabricated. The threshold currents are 1.95, 2.53, 2.9 mA, respectively, and the corresponding maximum output powers are 0.31, 1.11, 1.04 mW at room

收稿日期: 2012-12-12; 收到修改稿日期: 2013-01-16

基金项目: 国家自然科学基金(61234004, 61204056, 51172225, 60876036, 61106047)和国家自然科学基金重点项目(90923037)资助课题。

作者简介: 张建伟(1985—),男,博士研究生,主要从事半导体激光器结构设计及外延生长等方面的研究。

E-mail: zcjw1985@126.com

导师简介: 宁永强(1964—),男,博士,研究员,主要从事垂直腔面发射半导体激光器方面的研究。

E-mail: ningyq@ciomp.ac.cn(通信联系人)

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

temperature. The threshold current decreases first and then increased with the temperature increases, and the minimum value appears at 320~330 K. The measured results consist well with the gain-cavity characteristics of VCSEL.

Key words lasers; vertical cavity surface emitting lasers; high temperature operating; gain-cavity mode detuning; self-planar mesa structure

OCIS codes 000.3860; 120.6780; 140.3070; 140.5960

1 引 言

垂直腔面发射半导体激光器(VCSEL)由于具有低阈值电流、圆形对称输出光斑以及不存在腔面损伤等优点,在通信、医疗和航天等领域得到了广泛应用^[1~3]。近年来,光纤传感及芯片级原子钟系统等应用领域对 VCSEL 器件的高温工作性能提出了很高要求^[4~6],而这种性能是由 VCSEL 本身的增益-腔模关系决定的。与边发射半导体激光器不同,VCSEL 的激射波长由其腔模决定,而该腔模对应的光学增益则由其有源区提供。随着温度的升高,器件腔模及有源区增益谱均会朝长波方向漂移(红移),由于器件腔模相对于有源区增益谱红移速率要慢很多,因而所设计的 VCSEL 在室温下的增益峰值波长若短于腔模波长,则会使器件腔模在高温下获取较高的有源区增益。Soderberg 等^[7]利用 VCSEL 的增益-腔模失配特性获得工作温度为 85 °C 的 1.28 μm VCSEL;采用增益-腔模失配,Johnson 等^[8]获取了最高工作温度达 105 °C 的 680 nm VCSEL。器件的阈值电流受增益谱-腔模失配影响的研究成果也有报道^[9,10]。然而,对增益谱-腔模失配型高温工作 VCSEL 参数设计及结构优化方法的详细报道比较少见。由于在高温工作条件下 VCSEL 的有源区载流子限制能力降低,器件在高温工作时的自产热效应会增强,引起器件内部温升变大;虽然温度升高会使得增益-腔模更加匹配,但温度过高会导致有源区增益下降幅度过大,进

而使得器件阈值电流增大,同时输出光功率降低。因而有必要对器件的有源区及外延结构设计方法进行探讨,以保证器件在高温工作时表现出良好的工作性能。

本文通过分析温度变化对 VCSEL 器件内部参数的影响,设计了合理的势垒带阶以提高有源区在高温下的载流子限制作用;通过合理设计增益谱-腔模失配,设计了可用于高温工作的 VCSEL 器件结构,并制作了具有自平坦化台面的器件工艺结构,测试结果表明器件具有良好的高温工作性能。

2 器件结构及制作工艺

制作的垂直腔面发射半导体激光器外延结构截面图及自平坦化工艺制作结构图如图 1 所示。器件结构通过金属有机化合物气相沉淀(MOCVD)外延生长在 N 型掺杂 GaAs 衬底上,基本外延结构包括 N 型衬底,N 型分布式布拉格反射镜(DBR),多量子阱(QW)有源区,氧化限制层,P 型 DBR。有源区采用 $Al_{0.11}Ga_{0.89}As/Al_{0.36}Ga_{0.67}As$ 多量子阱结构。两侧 N-DBR 及 P-DBR 结构由 $Al_{0.3}Ga_{0.7}As/Al_{0.9}Ga_{0.1}As$ 周期性材料层组成,DBR 材料层界面加入 20 nm 渐变层结构以降低器件串联电阻。氧化层与有源区之间加入 3 对 P-DBR 结构,避免侧氧化过程中产生的应力影响有源区发光;氧化层的位置设计在光场波节处以降低光学散射损耗。

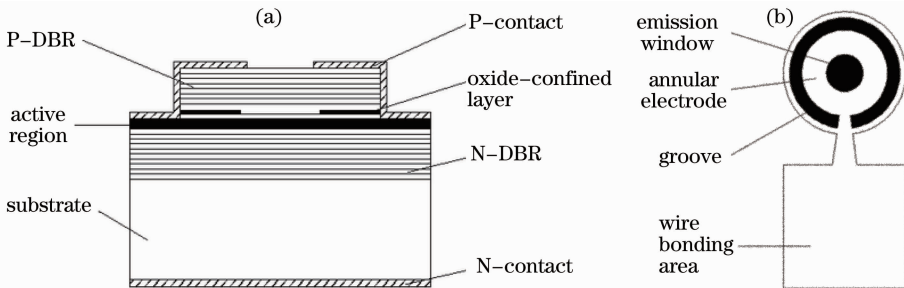


图 1 (a) VCSEL 外延结构图; (b) 自平坦化台面结构示意图

Fig. 1 (a) Schematic diagram of VCSEL epitaxy structure; (b) schematic diagram self-planar mesa structure

为提高工艺制作效率及器件性能,采用自平坦化的台面结构^[11]制作 VCSEL[如图 1(b)所示],该

结构的台面处与外部金丝焊接区之间留有一部分器件结构以直接形成平坦化台面,而不是传统工艺中

先制作圆形台面结构,再通过有机物填充台面下面的部分形成平坦化台面。该结构避免了常用的材料填充及平坦化处理流程,同时由于台面具有较大的横向尺寸,可以使器件工作时产生的热量有一部分沿横向扩散掉,相比传统的器件结构,该结构工艺简单,散热效果好,适用于制作高温工作 VCSEL 器件。

3 器件设计理论模型

3.1 有源区载流子限制因子

势垒高度为 ΔE 时,有源区量子阱内部的载流子限制因子可以表示为^[12]

$$\eta = \frac{J}{J + 2J_c} = \frac{1}{1 + 2J_c/J}, \quad (1)$$

式中 J 为量子阱内部的复合电流密度, J_c 为在有源区势垒层的复合电流密度,表达式为

$$J = d_w \xi_r, \quad (2)$$

$$J_c = \frac{2}{3} M d_b N \exp\left(-\frac{\Delta E}{kT}\right), \quad (3)$$

式中

$$M = \xi_c \xi_v \frac{[\exp(N/\xi_c) - 1] \cdot [\exp(N/\xi_v) - 1]}{N^2},$$

$$\xi_c = \frac{kTm_c}{\pi d_w \hbar^2}, \xi_v = \frac{kTm_v}{\pi d_w \hbar^2}, \xi_r = \frac{kTm_r}{\pi d_b \hbar^2}.$$

式中 M 为势垒层的载流子简化因子, ξ_c 、 ξ_v 和 ξ_r 分别为电子、空穴及振子的有效状态密度, m_c 、 m_v 和 m_r 分别为电子、空穴及振子有效质量, N 为有源区的载流子密度,器件在恒定电流下工作时 N 为常数, d_b 和 d_w 分别为势垒层及量子阱层的厚度。

3.2 有源区量子阱光增益

量子阱能级分裂后会产生分立能级,这些能级在载流子注入时会产生光学增益,该光学增益可表示为^[13]

$$g_0 = \sum_{j,i} g_{ji}(E_{cv}) = \frac{\pi e^2 \hbar}{\epsilon_0 c^3 m_0^2 n_{av}} \times$$

$$\sum_{j,i} \frac{1}{E_{cv}} |M_{ji}(E_{cv})|^2 \rho_{r,ji} \times [f_c(E_{cj}) + f_h(E_{vj}) - 1], \quad (4)$$

式中 $|M_{ji}(E_{cv})|$ 为能级 E_{cv} 的跃迁矩阵元; $\rho_{r,ji}$ 为第 j 个导带与第 i 个价带的能量态密度差; 半导体材料导带和价带的能态密度分别为 $\rho_c = 4\pi V \frac{(2m_c)^{3/2}}{\hbar^2} (E - E_c)^{1/2}$, $\rho_v = 4\pi V \frac{(2m_v)^{3/2}}{\hbar^2} (E_v - E)^{1/2}$; E 为分立能级,而 E_c 、 E_v 为导带底和价带顶对应的能级; V 为量子阱

的体积; n_{av} 为量子阱有源区的平均折射率; 理论分析单量子阱增益特性时,无需考虑波导结构,故该平均折射率即为量子阱的材料折射率; f_c 和 f_h 分别为电子和空穴在相应能带的费米函数。

3.3 阈值电流及转换效率

VCSEL 器件产生激光所需的阈值电流表达式为^[14]

$$I_{th} \approx \frac{qV_{active}BN_{tr}^2}{\eta_i} \exp\left[\frac{2(\langle\alpha_i\rangle + \alpha_m)}{\Gamma g_0}\right], \quad (5)$$

式中 q 为电子电荷量, V_{active} 为有源区体积, B 为有源区的双极复合系数, N_{tr} 为透明载流子密度, η_i 为内量子效率, $\langle\alpha_i\rangle$ 与 α_m 分别为器件平均内部损耗系数及反射镜损耗系数, Γ 为光学限制因子, g_0 为量子阱的材料增益。

VCSEL 器件工作时的最大转换效率 η_{max} 与器件斜率效率 η_d 、有源区异质结电压 V_J 及阈值电流 I_{th} 的关系可以表示为^[15]

$$\eta_{max} = \frac{h\nu}{qV_J} \frac{\eta_d(x_0 - 1)}{(x_0 + 1)}, \quad (6)$$

$$x_0 = \sqrt{1 + \frac{V_J}{I_{th}R_s}}, \quad (7)$$

$$\eta_d = \frac{\eta \alpha_m}{\langle\alpha_i\rangle + \alpha_m}, \quad (8)$$

式中 $h\nu$ 为器件出射光波对应的光子能量, R_s 为 VCSEL 器件串联电阻。

3.4 DBR 反射率及 VCSEL 反射谱

当光通过 k 层材料层后产生的传输矩阵可表示为^[16]

$$\begin{bmatrix} A \\ C \end{bmatrix} = \prod_{j=1}^k \begin{bmatrix} \cos \delta_j & \frac{i}{n_j} \sin \delta_j \\ in_j \sin \delta_j & \cos \delta_j \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ n_{k+1} \end{bmatrix}, \quad (9)$$

式中 A 、 C 为传输矩阵元, n_j 和 δ_j 为第 j 层的折射率及通过该层后产生的相位变化, n_{k+1} 表示出射介质的折射率。多层材料层的折射率可用传输矩阵元表示为

$$R = \frac{(n_0 A - C)(n_0 A - C)^*}{(n_0 A + C)(n_0 A + C)^*}, \quad (10)$$

式中 n_0 为入射介质的折射率, $*$ 表示取复共轭。

4 计算及测试结果

4.1 计算结果及讨论

根据第 3 节中的理论模型,通过理论计算来确定垂直腔面发射半导体激光器在不同工作温度下的内部性能变化。表 1 为计算中使用的激光器及材料的基本参数,表中 x 表示 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 材料中的 Al 组分。

表 1 激光器及材料特性参数

Table 1 Characteristic parameters of the laser and material

| Parameters | Value |
|---|----------------------|
| Average internal loss α_i/cm^{-1} | 20 |
| Series resistance R_s/Ω | 250 |
| Effective electron mass m_e/kg | $(0.063+0.083x)m_0$ |
| Effective hole masses m_v/kg | $(0.51+0.25x)m_0$ |
| Junction voltage V_d/V | 1.55 |
| Transparency carrier density N_{tr}/cm^{-3} | 2.6×10^{18} |
| Carrier density N/cm^{-3} | 5×10^{18} |
| Optical confinement factor Γ | 0.04 |
| Volume per quantum well V/cm^3 | 2×10^{-13} |
| Gain coefficient g_0/cm^{-1} | 2000 |
| Average refractive index of $\text{Al}_{0.11}\text{Ga}_{0.89}\text{As}$ | 3.7 |

垂直腔面发射半导体激光器连续工作时,有源区的载流子泄漏导致器件有源区温度不断增加,而温度的增加又进一步增加了载流子的泄漏程度,从而导致器件工作性能不断降低^[17]。因而器件在高温环境下稳定工作的首要决定因素就是器件对有源区的载流子限制能力,高温条件下由于载流子本身的电子热激发能 kT 增加,使得载流子易于逸出量子阱到达势垒区,因而提高载流子限制因子的最直接方法就是提高势垒高度。根据(1)式计算了量子阱及势垒厚度均为 8 nm 时不同势垒高度 ΔE 下量子阱内部的载流子限制因子受工作温度的影响,如图 2 所示。

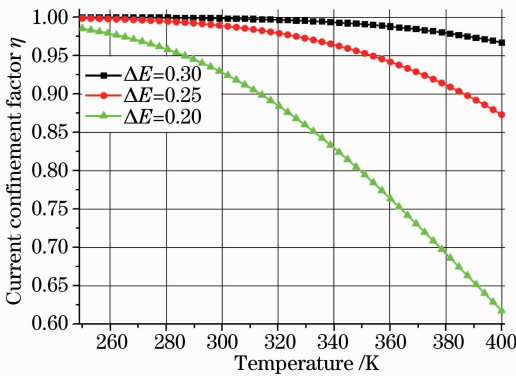


图 2 不同势垒高度下量子阱内部的载流子限制因子随工作温度变化关系

Fig. 2 Variation of the carrier confinement factor of quantum wells at different barrier values with operating temperature

由图 2 可知,随着工作温度的升高,载流子限制因子逐步下降。根据(2)式、(3)式,温度升高引起势垒层有效状态密度及载流子占据几率增加,虽然量子阱中的有效状态密度也会增加,然而总的效果表

现出势垒层复合电流密度增加量大于量子阱内部的复合电流密度增加量,因而载流子限制因子会随温度的升高而下降。图 2 中势垒高度越高,则载流子限制因子随工作温度的变化越小。当势垒高度为 0.25 eV 时,在 380 K 下的载流子限制因子仍能保持大于 90%。而势垒高度为 0.2 eV 时,载流子限制因子在 320 K 时小于 90%,不利于器件的高温工作。根据(2)式、(3)式,量子阱层越薄,则势垒层简并化因子 M 越大,对应的量子阱电流密度 J 越小,最终导致载流子限制因子 η 降低。综合上述考虑,设计有源区时选取势垒高度差在 0.25 eV 以上的材料体系,但量子阱厚度不能太薄。

AlGaAs 材料体系由于具有低的晶格应变,高的热导率,因而常被用于设计半导体激光器结构,并且是近红外波段 VCSEL 器件 DBR 反射镜的主要组成材料。采用 AlGaAs 材料做有源区避免了生长过程中材料应变引起的晶格缺陷,因而采用全 AlGaAs 体系设计 VCSEL 结构。考虑到高温工作时的载流子限制效果,采用高带阶 $\text{Al}_{0.11}\text{Ga}_{0.89}\text{As}/\text{Al}_{0.36}\text{Ga}_{0.64}\text{As}$ 材料分别作为有源区的量子阱及势垒。

选取量子阱层及势垒层厚度均为 8 nm,并根据(4)式计算了不同温度下有源区增益谱变化如图 3 所示。计算中采用的 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 体材料禁带宽度随温度的变化关系来源于文献[18]。图 3 中室温(300 K)下量子阱有源区的增益峰值波长为 779 nm。随着温度的升高,量子阱增益谱向长波方向漂移,并且增益峰值逐渐降低。当温度从 300 K 升高到 350 K,增益峰值对应的出光波长红移速率约为 0.27 nm/°C,而量子阱的增益峰值从 3000 cm^{-1} 降低到 2000 cm^{-1} 。因此,温度对量子阱增益影响很大。

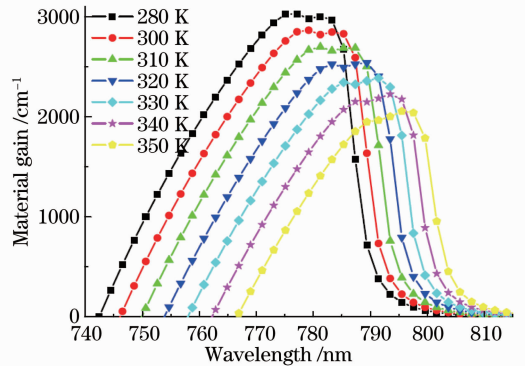


图 3 8 nm $\text{Al}_{0.11}\text{Ga}_{0.89}\text{As}/8 \text{ nm } \text{Al}_{0.36}\text{Ga}_{0.64}\text{As}$ 量子阱有源区的增益谱随温度的变化关系

Fig. 3 Variation of the material gain spectra of 8 nm $\text{Al}_{0.11}\text{Ga}_{0.89}\text{As}/8 \text{ nm } \text{Al}_{0.36}\text{Ga}_{0.64}\text{As}$ with operating temperature

由于量子阱的增益峰并不能够决定 VCSEL 器件的出光波长,而腔模才是决定器件出光波长的主要因素。根据传输矩阵理论,计算了常温下谐振腔光学厚度为 790 nm 的 VCSEL 器件反射谱随环境温度的变化如图 4 所示。由于 VCSEL 器件有源区的光学厚度为 790 nm,因而计算的 VCSEL 高反射带宽的中心位置出现了一个反射率很低、半峰全宽很小的尖峰,该尖峰最低点对应的光学波长即为 VCSEL 的腔模,也是 VCSEL 的输出光波长。由图 4 可知,腔模随工作温度的升高也有红移现象,这是因为 AlGaAs 材料折射率随温度的升高而增加,从而导致器件有源区及 DBR 光学厚度均增加,最终导致 VCSEL 器件整体反射谱红移,由于 AlGaAs 材料折射率随温度变化很小($2.67 \times 10^{-4} / ^\circ\text{C}$),因而腔模红移速率也较小,理论计算的 VCSEL 器件腔模红移速率约为 $0.056 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ 。

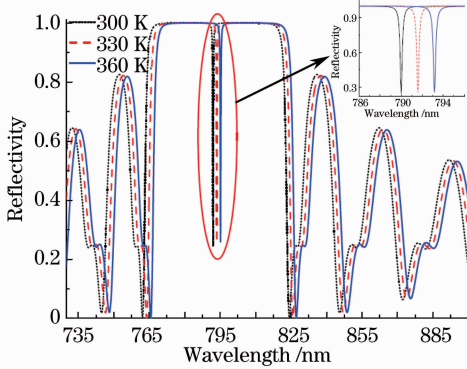


图 4 不同温度下 VCSEL 器件结构反射谱及腔模变化

Fig. 4 Reflection spectra and the cavity mode of the VCSEL structure at different operating temperatures

根据增益-腔模失配理论,若要获取高温环境下稳定工作的 VCSEL 器件,需要设计室温下增益峰值波长短于腔模的器件结构。所设计的器件在室温下的增益-腔模失配量为 11 nm,即室温下的 VCSEL 器件腔模为 790 nm,量子阱增益谱峰值波长设计为 779 nm。图 5 所示为所设计的 VCSEL 结构腔模、增益峰值波长以及与腔模相匹配的增益随环境温度的变化。由图 5 可知,由于常温下量子阱增益峰相对器件腔模蓝移了 11 nm,随着温度的升高,量子阱增益峰波长(红线)将不断靠近腔模(黑线),当温度升高到 350 K 左右时量子阱增益峰波长与腔模相匹配。而此时与腔模相对应的增益值(蓝线)在 2000 cm^{-1} 左右,此时虽然增益-腔模出现匹配,但是腔模所对应的增益却不是最大值。图 5 中与腔模相对应的增益值在 320~330 K 时达到最大,

根据(5)式,在该温度区域由于高的材料增益器件将会有最小的阈值电流。随温度的升高,与腔模相对应的增益值呈现出先增加后降低的变化趋势,因而(5)式中 VCSEL 器件的阈值电流将会呈现出先降低后增加的现象。

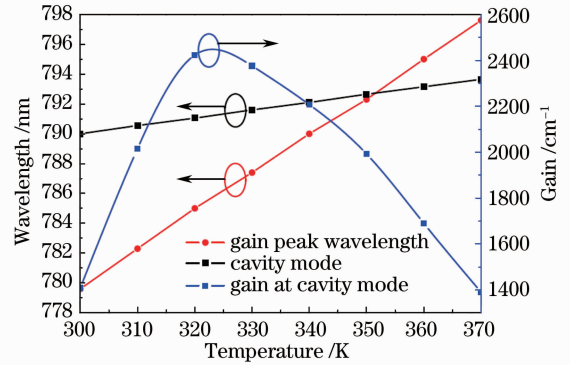


图 5 量子阱有源区的增益峰波长(黑线)、器件腔模(红线)以及与腔模相对应的增益(蓝线)随工作温度的变化

Fig. 5 Temperature dependence of the gain spectrum peak wavelength (black line), cavity mode (red line) and the corresponding gain (blue line)

VCSEL 器件有源区增益及腔模可以定量的估计 VCSEL 的阈值电流特性及出光波长,而两侧 DBR 的反射率则对器件的阈值电流和出光功率有直接影响。为使器件工作时有较为理想的阈值特性和较高的效率,利用(5)、(6)式分析了室温下器件阈值电流(蓝线)与转换效率(黑线)随两侧 DBR 反射率乘积的关系,如图 6 所示。

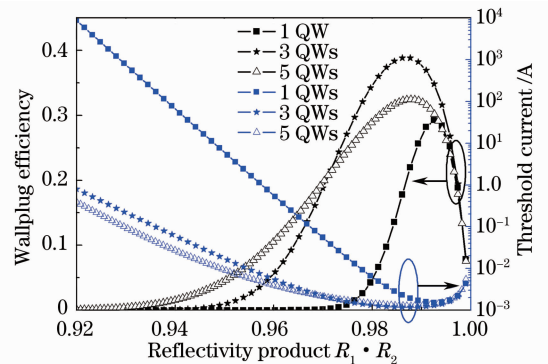


图 6 不同量子阱个数时 VCSEL 器件的阈值电流(蓝线)及转换效率(黑线)与 DBR 反射率乘积的关系

Fig. 6 Threshold current (blue line) and the wallplug efficiency (black line) dependency of the reflectivity product of the P-DBR and the N-DBR, with the different numbers of quantum wells

由图 6 可知,量子阱个数越少,则要达到低的阈值电流和高的转换效率所需的 DBR 反射率越高。对于 3 个量子阱的有源区,当 VCSEL 器件两边

DBR 反射率乘积 ($R_1 \cdot R_2$) 在 98.5% 左右时, 器件的阈值电流最低, 相应的器件转换效率也较高。由于计算中采用的串联电阻、增益及发光区体积等参数较为理想, 阈值电流及转换效率均为定性表示, 因而与器件制作后的实际参数有一定差别。

考虑到 AlGaAs 材料对 790 nm 波段的光学吸收, 采用 $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}/\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$ 层作 DBR 周期性材料层, 为有效降低 DBR 结构界面势垒引起的串联电阻, 材料层界面加入 20 nm 渐变层^[19,20]。根据传输矩阵理论设计 VCSEL 器件两边 N-DBR 与 P-DBR 反射率乘积为 98.5% 时, 所需的 N-DBR 对数及 P-DBR 对数分别为 47 对与 36 对。

表 2 制作的 VCSEL 器件性能参数

Table 2 Measured device parameters of the fabricated VCSEL

| Oxide aperture / μm | Threshold current / mA | | Power / mW | | Maximum power / mW | |
|--------------------------------|------------------------|-------|---------------------------|---------------------------|--------------------|------|
| | 300 K | 340 K | $I=2I_{th}, 300\text{ K}$ | $I=2I_{th}, 340\text{ K}$ | 300 K | 340K |
| 7 | 1.96 | 2.04 | 0.08 | 0.075 | 0.31 | 0.2 |
| 9 | 2.54 | 2.67 | 0.26 | 0.24 | 1.11 | 0.87 |
| 13 | 2.9 | 3.25 | 0.28 | 0.26 | 1.04 | 0.8 |

如表 2 可知, 常温下 7、9、13 μm 三种氧化口径器件的最大输出功率分别为 0.31、1.11、1.04 mW, 当工作温度达到 340 K 时, 所制作的激光器最大输出功率为 0.2、0.87、0.8 mW, 比常温下最大功率有所降低。但是当注入电流为阈值电流的 2 倍时, 器件在 340 K 时的输出功率仍为 300 K 时的输出功率的 90% 以上。常规 VCSEL 器件工作电流一般设定在 2~3 倍的阈值电流以保证器件稳定工作, 因而测试结果说明所制作的 VCSEL 器件在高温下有好的功率特性。

图 7 所示为在 300、320、340 K 温度下测量的三种不同氧化口径 VCSEL 器件的功率-电流 ($P-I$) 特

4.2 器件测试结果及讨论

根据 4.1 节的器件结构设计, 采用 MOCVD 外延生长了相应的结构并进行了工艺制作。制作的自平坦化台面器件氧化孔径分别为 7、9、13 μm , 出光口大小分别为 10、15、20 μm , 器件在室温下的串联电阻分别为 79.5、56.1、33.1 Ω 。表 2 所示为在不同温度下测试的三种氧化口径 VCSEL 器件的功率及阈值电流特性。由表 2 可知, 温度的升高会导致器件阈值电流增加, 输出功率降低。然而, 在后面的分析中可知, 对于增益-腔模失配型的 VCSEL 器件, 阈值电流并非随温度的增加而线性增加。

性曲线。由图 7 可知, 随着工作温度的升高, 器件最大输出功率降低, 且器件产生输出功率饱和现象所需的注入电流也越来越小, 这是由高温工作下器件的载流子限制因子降低所造成的。所制作的器件台面尺寸及氧化孔径越大, 器件的最大工作电流越大。这是由于氧化口径大, 则有源区的发光面积大, 相同注入电流下有源区的电流密度较小, 产生的热量也少, 因而器件工作时的温度变化小, 载流子限制因子变化小。从器件的 $P-I$ 特性曲线可知, 器件虽然达到热饱和, 但是注入电流继续增加时器件的输出功率仍然没有明显减小, 这有可能是因为采用了高带阶的势垒层从而使得器件有源区的载流子限制能力有所提升。

图 7 中的测试结果表明, 所制作器件的阈值电流并没有像普通的面发射激光器那样随温度的升高而迅速变大, 而是在三种工作温度下的阈值电流值相近, 这是器件本身的增益-腔模失配所起的作用。测量不同氧化口径器件的阈值电流随工作温度的关系如图 8 所示。

由图 8 可知, 所制作的三类 VCSEL 器件的阈值电流随温度的变化趋势一致。正如 4.1 节中根据图 5 所预测的阈值电流变化趋势一样, 由于 VCSEL 器件腔模对应的增益先增加再减小, 从而导致器件阈值电流随温度的升高呈现出先减小再变大的趋势。图 5 中腔模对应的增益最大值在工作温度

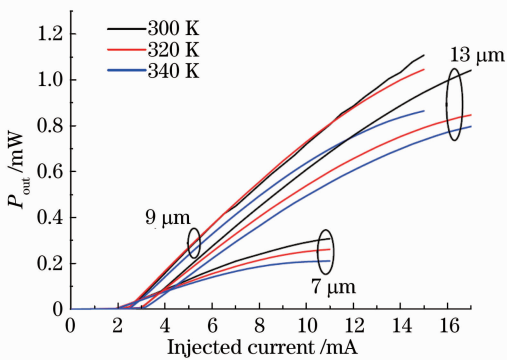


图 7 不同氧化口径的自平坦化 VCSEL 器件连续工作功率-电流特性

Fig. 7 Continuous working power-current characteristics of self-planar VCSEL with different oxide apertures

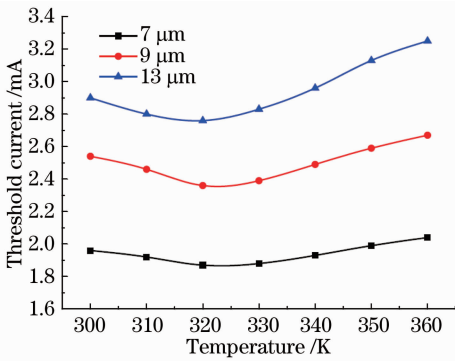


图 8 制作的自平坦化 VCSEL 器件在不同工作温度下的阈值电流特性

Fig. 8 Threshold current characteristics of self-planar VCSEL at different operating temperatures

320 K 左右出现, 而图 8 中器件阈值电流最低点对应的工作温度也在 320 K 附近, 这是由于温度在 320 K 附近时, 器件的载流子限制因子变化不大 (如图 2 所示), 由载流子限制因子决定的内量子效率 η_i 变化也不大, 因而此时 (5) 式中的阈值电流主要由增益决定。随着温度的继续增加, 器件阈值电流不断增加, 当温度增加到 340 K 时, 器件阈值电流接近或超过了 300 K 时的阈值电流, 而图 5 表示, 直至 370 K 时腔模对应的增益才降低到与 300 K 时的增益相同。这是由于温度增加到 340 K 时, 除了有源区的增益 g_0 降低外, 载流子限制因子也明显降低, 导致内量子效率 η_i 降低, 由 (5) 式可知, 器件阈值会由于这两个参数的降低而迅速增加。

5 结 论

通过分析温度对 VCSEL 器件有源区载流子限制因子、光增益、腔模以及器件阈值电流等特性的影响, 设计了增益-腔模失配量为 11 nm 的 VCSEL 器件结构, 并制作了具有自平坦化台面结构的 VCSEL 器件。理论分析表明, 随着温度的增加, 增益-腔模失配型 VCSEL 器件的增益谱与腔模逐渐匹配, 而与腔模相对应的增益值表现出先增加后减小的趋势。在器件测试中观察到了由此引起的阈值电流随温度先减小后增变大的现象, 这是由设计的增益-腔模失配结构决定的。制作了不同氧化口径的自平坦化台面器件, 变温测试器件阈值电流, 发现在温度为 320~330 K 时阈值电流最小, 该结果与理论分析的增益-腔模偏离趋势是一致的。

参 考 文 献

1 K. Iga. Surface-emitting laser-its birth and generation of new

- optoelectronics field[J]. *IEEE J. Selected Topics in Quantum Electronics*, 2000, **6**(6): 1201~1213
- 2 Zhang Lisen, Ning Yongqiang, Zhang Xing *et al.*. Optimization of n -DBR in high power vertical-cavity surface-emitting laser under a short pulsed operation[J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(5): 0502003
- 张立森, 宁永强, 张 星等. 高功率窄脉冲垂直腔面发射激光器 n -DBR 反射率的优化[J]. *中国激光*, 2012, **39**(5): 0502003
- 3 Jia Baohui, Liu Chao, Fu Li *et al.*. Effect of the combined use of transmyocardial laser revascularization and implantation of endothelial progenitor cells on canine ischemic heart[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(6): 1654~1658
- 贾宝辉, 刘 超, 付 莉等. 激光心肌血运重建联合血管内皮祖细胞移植治疗缺血性心脏病[J]. *中国激光*, 2010, **37**(6): 1654~1658
- 4 R. Rossbach, T. Ballmann, R. Butendeich *et al.*. Red VCSEL for high-temperature applications[J]. *J. Crystal Growth*, 2004, **272**(1-4): 549~554
- 5 I. A. Derebezov, V. A. Haisler, A. K. Bakarov *et al.*. Single-mode vertical-cavity surface-emitting lasers for atomic clocks[J]. *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*, 2009, **45**(4): 361~366
- 6 A. Al-Samaneh, M. B. Sanayeh, S. Renz *et al.*. Polarization control and dynamic properties of VCSELs for MEMS atomic clock applications [J]. *Photonics Technology Letters*, 2011, **23**(15): 1049~1051
- 7 E. Soderberg, P. Modh, J. S. Gustavsson *et al.*. High speed, high temperature operation of 1.28 μm singlemode InGaAs VCSELs[J]. *Electronics Letters*, 2006, **42**(17): 978~979
- 8 K. Johnson, M. Hibbs-Brenner, W. Hogan *et al.*. Record high temperature, high output power red VCSELs[C]. *SPIE*, 2011, **7952**: 795208
- 9 S. Mogg, N. Chitica, U. Christiansson *et al.*. Temperature sensitivity of the threshold current of long-wavelength InGaAs-GaAs VCSELs with large gain-cavity detuning[J]. *J. Quantum Electronics*, 2004, **40**(5): 453~461
- 10 J. Wu, W. Xiao, Y. M. Lu. Temperature and wavelength dependence of gain and threshold current detuning with cavity resonance in vertical-cavity surface-emitting lasers [J]. *IET Optoelectron.*, 2007, **1**(5): 206~210
- 11 Shi Jingjing, Tian Zhenhua, Qin Li *et al.*. 850 nm high power vertical-cavity surface-emitting lasers[J]. *J. Optoelectronics and laser*, 2010, **21**(10): 1445~1448
- 史晶晶, 田振华, 秦 莉等. 850 nm 大功率垂直腔面发射激光器 [J]. *光电子·激光*, 2010, **21**(10): 1445~1448
- 12 Du Baoxun. *Semiconductor Laser Theory* [M]. 2nd edition Beijing: The Publish of Engineering Industry, 2004. 137~174
- 杜宝勋. *半导体激光器原理* [M]. 第 2 版北京: 兵器工业出版社, 2004. 137~174
- 13 P. M. Enders. Enhancement and spectral shift of optical gain in semiconductors from non-Markovian intraband relaxation[J]. *J. Quantum Electronics*, 1997, **33**(4): 580~588
- 14 Y. M. Deng. Gallium Arsenide Based Semiconductor Laser Design and Growth by Metal-Organic Chemical Vapor Deposition [D]. California: The Graduate School University of Southern California, 2006. 9~12
- 15 S. F. Yu. Analysis and Design of Vertical Cavity Surface Emitting Lasers [M]. Wiley Interscience publication, 2003. 75~77
- 16 Wang Xiaodong, Wu Xuming, Wang Qing *et al.*. Optical characteristics of DBR with inhomogeneous graded interfaces[J]. *Acta Physica Sinica*, 2006, **55**(10): 4983~4986
- 王小东, 吴旭明, 王 青等. 具有非均匀渐变界面 DBR 的光学特性分析[J]. *物理学报*, 2006, **55**(10): 4983~4986
- 17 P. P. Baveja, B. Kögel, P. Westbergh *et al.*. Impact of device

- parameters on thermal performance of high-speed oxide-confined 850 nm VCSELs[J]. *J. Quantum Electronics*, 2012, **48**(1): 17~26
- 18 Y. A. Chang, J. R. Chen, H. C. Kuo *et al.*. Theoretical and experimental analysis on InAlGaAs/AlGaAs active region of 850 nm vertical-cavity surface-emitting lasers [J]. *J. Lightwave Technology*, 2006, **24**(1): 536~542
- 19 M. Hong, J. P. Mannaerts. A simple way to reduce series resistance in p-doped semiconductor distributed Bragg reflectors [J]. *J. Crystal Growth*, 1991, **111**(1): 1071~1075
- 20 T. Li, Y. Q. Ning, E. J. Hao *et al.*. Design and optimization of DBR in 980 nm bottom-emitting VCSEL [J]. *Science in China Series F: Information Sciences*, 2009, **52**(7): 1266~1271

栏目编辑: 张 腾