

亚毫安阈值的 $1.3\text{ }\mu\text{m}$ 垂直腔面发射激光器 *

劳燕锋[†] 曹春芳 吴惠桢 曹 萌 龚 谦

(中国科学院上海微系统与信息技术研究所,信息功能材料国家重点实验室,上海 200050)

(2008年8月23日收到 2008年9月10日收到修改稿)

设计并研制了室温连续工作的单模 $1.3\text{ }\mu\text{m}$ 垂直腔面发射激光器(VCSEL),阈值电流为 0.51 mA ,最高连续工作温度达到 82°C ,斜率效率为 0.29 W/A .采用 InAsP/InGaAsP 应变补偿多量子阱作为有源增益区,由晶片直接键合技术融合 InP 基谐振腔和 GaAs 基 GaAs/Al(Ga)As 分布布拉格下反射腔镜,并由电子束蒸发法沉积 $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$ 介质薄膜上反射腔镜形成 $1.3\text{ }\mu\text{m}$ VCSEL 结构.讨论并分析了谐振腔模式与量子阱增益峰相对位置对器件性能的影响.

关键词:垂直腔面发射激光器,晶片直接键合,应变补偿多量子阱

PACC:7280E, 4280S, 8115N

1. 引言

垂直腔面发射激光器^[1](vertical-cavity surface-emitting laser, VCSEL)是光纤通信系统中的重要光源之一,它同时在并行光互连^[2]、气体探测^[3]、数据存储、激光显示^[4]等领域内显示出广阔的应用前景.VCSEL 原理最早在 1977 年被提出,并于 1979 年实现第一个 77 K 脉冲工作的 $1.3\text{ }\mu\text{m}$ 激光器^[5].此后以 GaAs 为基底的短波段($<1.0\text{ }\mu\text{m}$)VCSEL 获得了广泛发展,相继研制出亚毫安阈值、高工作温度以及高输出功率的器件^[6].近年来,随着外延技术和器件研制工艺的发展,长波段($>1.0\text{ }\mu\text{m}$)VCSEL 也获得了一定的发展.InP 基材料由于本身的限制如折射率差异小、四元系材料热导率低等,研制出高性能 InP 基全外延 VCSEL 存在一定难度^[7].目前已有多 种研究方案被用于研制长波长 VCSEL,如利用 GaAs/Al(Ga)As 分布布拉格反射镜(distributed Bragg reflector, DBR)具有高反射率和高热导率的特点,在 GaAs 基底上外延 GaInNAs^[8],InGaAs^[9] 和 GaAsSb^[10] 量子阱以及 InAs 量子点^[11]等有源材料,将 GaAs 基 VCSEL 激射波长延长到 $1.3\text{ }\mu\text{m}$.而以高导带带阶的 InP 基 AlGaInAs 量子阱作为增益区,分别采用 AlGaInAs/AlInAs DBR 与介质薄膜 DBR 的组合结构^[12],与 InP 晶格匹配的锑化物 DBR^[13]以及直接键

合的 GaAs/Al(Ga)As DBR^[14]等方法构成上下反射腔镜,也使高性能长波长 VCSEL 的研制取得了进展,然而研制过程相对复杂且有较大难度,如锑化物材料的外延^[13]、二次外延实现掩埋隧道结限制孔径^[12, 14]、应用两次晶片键合技术^[14]等.

本文以 InAsP/InGaAsP 应变补偿量子阱(strain-compensated multi-quantum wells, SC-MQWs)为有源增益材料,以 $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$ 介质薄膜 DBR 和 GaAs/Al(Ga)As 半导体 DBR 分别作为上下反射腔镜,研制出室温连续工作的亚毫安阈值 $1.3\text{ }\mu\text{m}$ VCSEL 激光器.InAsP/InGaAsP 量子阱具有 $0.5\text{--}0.7\Delta E_g$ (ΔE_g 为势垒与势阱的禁带宽度差)的导带带阶,介于 InGaAsP 量子阱($0.35\Delta E_g$)和 AlGaInAs 量子阱($0.72\Delta E_g$)之间^[15]已被用于制作高性能边发射激光器^[16].以 AlGaInAs 量子阱为有源增益区的 VCSEL 显示出较高的器件性能^[12\text{--}14]如连续工作温度高达 134°C ^[14];对于实际应用,器件稳定性是一个重要因素,然而 Al 材料存在着稳定性问题,其制作的器件寿命仍有待于实际验证^[17].我们选择无 Al 的 InP 基 InAsP/InGaAsP 量子阱结构,保证了高温度性能的同时也有利于器件的稳定性.制作过程包括一次晶片直接键合和选择性侧向腐蚀制作限制孔径等工艺,与目前取得较好性能 VCSEL 器件中所采用的两次晶片键合、二次外延掩埋隧道结技术相比,工艺过程相对简单.文中将包含 InAsP/InGaAsP SC-MQWs 的

* 国家重点基础研究发展计划(973)项目(批准号 2003CB314903)的资助课题.

† E-mail: lyflys@hotmail.com

谐振腔分别与两种具有不同反射中心的 GaAs/Al(Ga)As DBR 进行直接键合,制作出两种腔模与增益峰值波长差值($\Delta\lambda_{\text{Cavity-Gain}}$)的 $1.3\text{ }\mu\text{m}$ VCSEL 器件,结果表明 $\Delta\lambda_{\text{Cavity-Gain}}$ 是影响器件性能的重要因素之一。实验中通过调整腔模位置达到控制 $\Delta\lambda_{\text{Cavity-Gain}}$ 的目的,最终实现了 $1.3\text{ }\mu\text{m}$ VCSEL 亚毫安量级阈值电流的激射。

2. 器件结构与实验

为了实现激光振荡,VCSEL 有源区须提供如下的阈值增益:

$$g_{\text{th}} = \frac{1}{\Gamma} \left[\alpha + \ln\left(\frac{1}{R}\right) / L_{\text{eff}} \right]. \quad (1)$$

其中 Γ 是光场限制因子,中括号中第一项 α 是谐振腔内总的光学损耗包括俄歇复合、吸收、散射和衍射损耗等,第二项是腔镜透射损耗, R 是上下腔镜的平均反射率 $\sqrt{R_1 R_2}$, L_{eff} 是将 VCSEL 等效成 F-P 腔结构的有效腔长。为了实现低阈值激射,应尽可能增大腔镜反射率和减小损耗。InP 基 DBR 如 InP/InGaAsP 材料体系的折射率差异小(0.2),需要生长较多周期数来取得高反射率,由此增加了材料外延难度。我们采用较大折射率差(0.5)的 GaAs/Al(Ga)As DBR,如图 1 所示的 VCSEL 结构,然而实验中需要通过晶片直接键合技术实现 InP 基和 GaAs 基材料两者的融合,上 DBR 则采用折射率更大(0.6)的 SiO₂/TiO₂ 介质薄膜 DBR。因上 DBR 为绝缘材料,上电极制作在 InP 基谐振腔的上侧,这导致注入电流易于聚集在量子阱有源区边缘,在上电极与量子阱之间加入一个隧道结,利用其高电导率特性可极大地改善注入电流的均匀性。此外,InP 基材料上下两侧各生长有一组(7.5 nm)InP(7.5 nm)InGaAsP 超晶格结构(superlattice, SL),靠近 GaAs 基材料侧的 SL 有利于减小键合过程对 InP 基材料的影响^[17],而另一组 SL 用于选择性湿法腐蚀调节 InP 基谐振腔厚度,达到控制腔模的目的。

谐振腔模式增益是影响 VCSEL 性能的另一个重要因素,它与腔模和增益谱的相对位置有关。量子阱增益是波长、温度和载流子浓度的函数,当升高温度和增加注入电流时,增益谱和腔模以不同速率红移,这导致不同工作条件下腔模位置处的增益也有所不同,反之腔模-增益谱峰值波长差值 $\Delta\lambda_{\text{Cavity-Gain}}$ 值决定了器件所能获得最大增益的工作条件,因而影

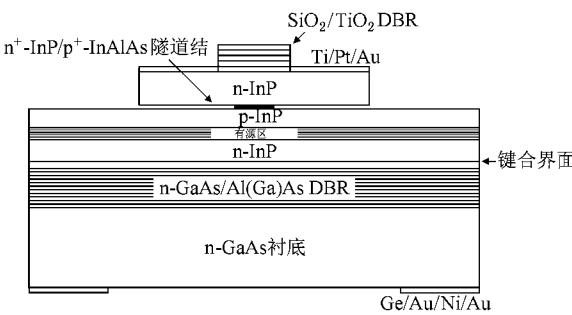


图 1 $1.3\text{ }\mu\text{m}$ VCSEL 器件结构示意图

响器件的性能如阈值电流、最高工作温度等。我们制作了两种 $\Delta\lambda_{\text{Cavity-Gain}}$ 值的 VCSEL,并对两种器件结果作了分析与讨论。

图 1 是 $1.3\text{ }\mu\text{m}$ VCSEL 器件结构图,InP 基与 GaAs 基材料均由气态源分子束外延得到。作为谐振腔的 InP 基有源材料腔长为 4.25λ ,它由量子阱、隧道结和 InP 空间层组成。量子阱由 7 个厚度为 6.1 nm 的 InAs_{0.44}P 量子阱(压应变)和 6 个厚度为 7.5 nm 的 InGa_{0.36}As_{0.44}P 层(张应变)构成应变补偿结构,外侧阱以 InP 作为电子势垒层,量子阱光致发光(photoluminescence, PL)波长为 1314 nm。两种 GaAs 基 DBR 用于研制器件 I 和 II,它们分别是反射中心在 1294 nm 的 23 周期 GaAs/Al(Ga)As DBR 和反射中心在 1355 nm 的 30 周期 GaAs/Al(Ga)As DBR,材料外延中我们采用数字合金技术来生长 Al(Ga)As^[18],即 AlAs 层中间隔插入 GaAs 原子层,一定程度上阻隔了杂质的累积,有利获得平整的表面。23 周期 GaAs 基 DBR 反射率低于 99.5%,因而作为器件 I 中的激光出射侧腔镜,即底出射型,上腔镜 SiO₂/TiO₂ DBR 则使用了 12 周期,反射率大于 99.9%。器件 II 中 GaAs 基 DBR 反射率为 99.8%,因此采用顶出射型方案 8 周期反射率为 99.5% 的 SiO₂/TiO₂ DBR 作为激光出射侧腔镜。SiO₂/TiO₂ 介质薄膜 DBR 具有很大的反射带宽(> 250 nm),可以忽略其对腔模的影响。隧道结由浓度为 $3.0 \times 10^{19}\text{ cm}^{-3}$ 的 20 nm n⁺-InP(Si)和浓度为 $1.0 \times 10^{20}\text{ cm}^{-3}$ 的 15 nm p⁺-InAlAs(C)组成,它位于驻波波节处以减小吸收损耗。用于选择性侧向腐蚀的 InAlAs 包括隧道结中的高掺杂层和空间层中的低掺杂层,总计 50 nm。

器件 I 和 II 分别在 630 和 605°C 下进行直接键合,具体实验参见文献[19]。键合后通过选择性湿法腐蚀 InP/InGaAsP SL 控制腔模位置,器件 I 和 II 的腔模分别为 1288.5 nm 和 1331.3 nm,对应 $\Delta\lambda_{\text{Cavity-Gain}}$ 分

别为 -25.5 nm 和 17.3 nm 。制作中,首先由非选择性湿法腐蚀出圆形台面,其次采用柠檬酸系溶液(柠檬酸:双氧水体积比 = 10:1)选择性侧向腐蚀 InAlAs 层以制作限制孔径,然后涂覆聚酰亚胺绝缘材料隔离器件并蒸镀金属电极,最后由电子束蒸发法沉积 $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$ 介质薄膜上 DBR 完成 $1.3 \mu\text{m}$ VCSEL 激光器的制作。

3. 结果与讨论

图 2 和图 3 分别为器件 I 和 II 的电流-功率($I-P$)特性曲线。器件 I 采用直径为 $15 \mu\text{m}$ 的限制孔径,测试表明它在室温(room-temperature, RT, 20°C)脉冲电流注入下实现激光,阈值电流为 13.5 mA ,对应电流密度为 7.6 kA/cm^2 。由于限制孔径尺寸较大($>8 \mu\text{m}$),孔径衍射损耗可以忽略不计,高阶横模达到激光阈值而使激光光谱呈现多模特征^[20]。器件 II 采用了 $5 \mu\text{m}$ 限制孔径,其在室温连续(room-temperature continuous-wave, RT-CW)电流注入下达到激光,阈值电流为 0.51 mA ,最高光功率为 0.7 mW ,斜率效率为 0.29 W/A ,单模线宽为 0.5 Å ,因侧向腐蚀存在一定的各向异性,小尺寸孔径呈现出介于正方形和圆形之间的图案,以两者面积平均值表示孔径有效面积,则得到对应阈值电流密度为 2.3 kA/cm^2 。

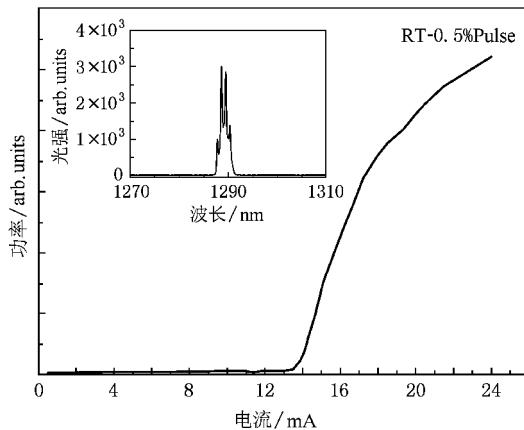


图 2 器件 I 的室温脉冲 $I-P$ 特性(其中插图为 1.5 倍阈值电流时的激光光谱)

一般而言小尺寸孔径易使电流出现非均匀注入,因而对于同一结构的器件,小尺寸孔径阈值电流密度要大于大尺寸孔径器件^[21]。我们实验中,虽然器件 I 采用了 $15 \mu\text{m}$ 的限制孔径,但其阈值电流密

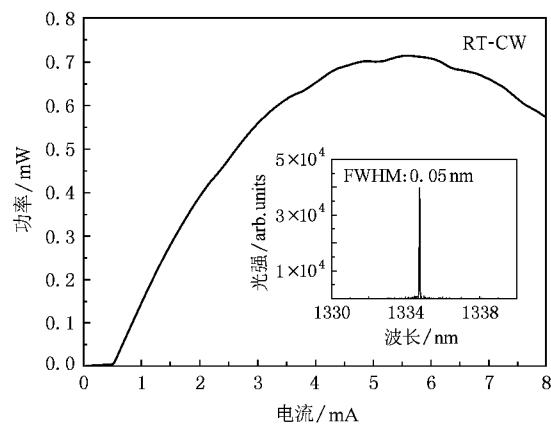


图 3 器件 II 的室温连续 $I-P$ 特性(其中插图为 10 倍阈值电流时的激光光谱)

度高达 7.6 kA/cm^2 。器件 I 和 II 的性能差异与腔模增益峰值波长差值 $\Delta\lambda_{\text{Cavity-Gain}}$ 有着很大关系。注入电流导致器件内部温度升高,它使(1)增益谱和腔模红移、(2)增益减小以及(3)价带带间吸收和俄歇复合损耗增加。测试不同温度下的 InAsP/InGaAsP 应变补偿量子阱 PL 谱^[22]和器件 II 的激光谱我们得出量子阱增益谱和腔模随温度的红移速率分别为 0.40 nm/K 和 0.07 nm/K 。图 4 是由传递矩阵方法计算得到的 InAsP/InGaAsP 量子阱光增益谱。在占空比为 0.5% 的脉冲电流注入下忽略温升效应,在电流 I_0

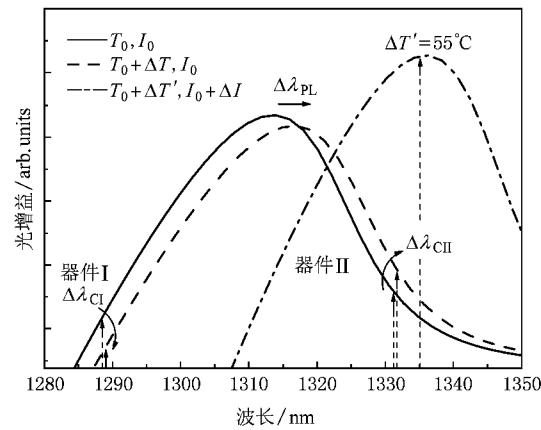


图 4 不同温度和电流下腔模与增益谱的相对关系

和不计温度变化即室温 T_0 下的光增益谱如图 4 中实线所示;当以连续电流 I_0 注入时,器件内部的温度变化 ΔT 使增益谱红移 $\Delta\lambda_{\text{PL}}$ (如图中虚线所示)。图中还同时画出了器件 I 和 II 的腔模所处位置 λ_{CI} 和 λ_{CII} 以及温度引起的变化 $\Delta\lambda_{\text{CI}}$ 和 $\Delta\lambda_{\text{CII}}$ 。升高温度使增益峰以 0.33 nm/K 速率远离 λ_{CI} ,器件 I 所能获

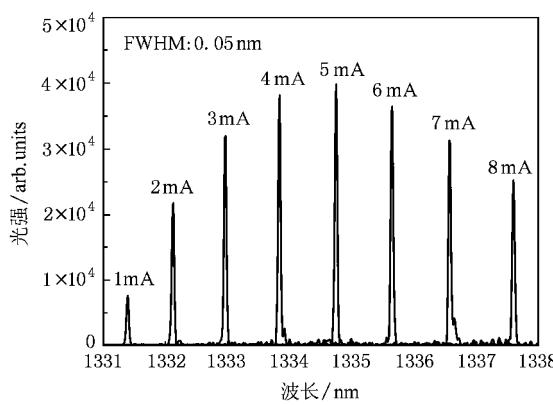


图 5 器件 II 在不同注入电流下的激光光谱

得的增益因此减小,致使无法在连续电流下激射。对于器件 II,连续电流引起的温升效应使增益峰以 0.33 nm/K 的速率向 λ_{c2} 靠近,使腔模 λ_{c2} 处增益不断增大达到阈值而实现激射,在更大注入电流下,增益谱继续红移并且逐渐增大,激光功率随之增大,当增益峰与腔模重合时,功率达到最大值,如图中点划线所示。图 5 是随注入电流变化的激光光谱,可以看出电流的增大使激光峰以 0.91 nm/mA 的速率红移,这是不断增大的注入电流使器件内部持续升温导致的结果;器件 II 获得最大光功率时的电流为 5.5 mA (图 3)对应激光波长为 1335.2 nm ,相比激射前腔模红移了 3.9 nm 可见器件内部温度升高了 $55\text{ }^\circ\text{C}$,这与图 4 中腔模与增益峰重合所需的温度变化是一致的。

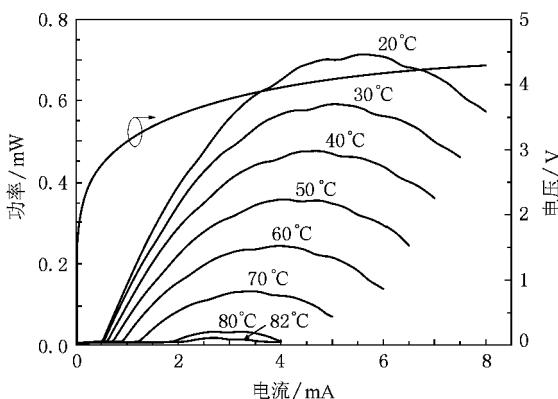


图 6 器件 II 在不同测试温度下的 I-P 特性

器件 I 的 $\Delta\lambda_{\text{Cavity-Gain}}$ 值小于 0, 它使器件在连续电流注入时无法达到激射所需要的阈值增益;而在脉冲电流下,可认为增益谱位置不发生变化,因而在

一定大小的注入电流下 λ_{c1} 处取得阈值增益实现激射,实验中测到的输出光功率比较小,一方面它与脉冲电流工作有关,而且 λ_{c1} 位于增益峰位左侧且偏离 25.5 nm ,致使不能得到较高的峰值增益(图 4),另一方面器件为底出射型,衬底以及衬底-空气交界面对激光存在一定吸收与反射,进一步减小了光功率。器件 II 中则采用了 17.3 nm 的 $\Delta\lambda_{\text{Cavity-Gain}}$,连续电流及其引起的温升效应均使 λ_{c2} 处的增益变大,它是使激光器能够在亚毫安量级电流注入下得到足够高增益而达到阈值的重要因素之一。器件 II 选取的 $\Delta\lambda_{\text{Cavity-Gain}}$ 值使其取得了 0.7 mW 的峰值功率和 0.29 W/A 的斜率效率。器件 I 和 II 显著的激光功率差别还与晶片键合时的退火过程有关,高温退火在一定程度上降低了量子阱有源区性能,然而高达 $630\text{ }^\circ\text{C}$ 的退火使器件 I 中量子阱退化较 $605\text{ }^\circ\text{C}$ 下退火的器件 II 更加严重。低阈值电流工作性能使器件内部温升小,有利于提升 VCSEL 温度性能。图 6 是不同测试温度下器件 II 的 I-P 特性,最高工作温度可达到 $82\text{ }^\circ\text{C}$,而温度引起的损耗如价带带间吸收和俄歇复合使阈值电流逐渐增大,温度升高使增益峰向腔模靠近,当温度大于 $75\text{ }^\circ\text{C}$ (即温升 $55\text{ }^\circ\text{C}$)时, $\Delta\lambda_{\text{Cavity-Gain}} < 0$,因此 $70\text{ }^\circ\text{C}$ 以上时器件性能快速恶化, $82\text{ }^\circ\text{C}$ 下阈值电流处的腔模小于增益峰 7.3 nm ,更高温度下器件无法实现连续激射。由此可见,室温下的 $\Delta\lambda_{\text{Cavity-Gain}}$ 值也是影响 VCSEL 温度性能的关键因素,增大该值有利于实现更高工作温度的器件性能。

4. 结 论

利用晶片直接键合技术研制了以 InP 基 InAsP/InGaAsP SC-MQWs 为有源区、GaAs/AlGaAs 半导体和 $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$ 介质薄膜 DBR 为反射腔镜的 $1.3\text{ }\mu\text{m}$ VCSEL 激光器。结果表明,腔模与增益谱峰值波长差值 $\Delta\lambda_{\text{Cavity-Gain}}$ 是影响器件性能的一个重要因素,通过合理设计 $\Delta\lambda_{\text{Cavity-Gain}}$ 值实现了亚毫安阈值的 $1.3\text{ }\mu\text{m}$ VCSEL,阈值电流为 0.51 mA ,对应阈值电流密度为 2.3 kA/cm^2 ,斜率效率为 0.29 W/A ,最高连续工作温度达到 $82\text{ }^\circ\text{C}$ 。分析表明, $\Delta\lambda_{\text{Cavity-Gain}}$ 也是影响 VCSEL 温度性能的关键因素,增大该值有利于实现更高工作温度的器件性能。

- [1] Iga K 2000 *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **6** 1201
- [2] Guenter J K , Tatum J A , Clark A et al 2001 *Proceedings of the SPIE* **4286** 1
- [3] Robert S , Ortsiefer M , Rosskopf J et al 2004 *Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers VII Proceedings of SPIE* **5364** 1
- [4] Michael Bove V , Jr. , Sierra W 2003 *SID Symposium Digest of Technical Papers* **34** 708
- [5] Soda H , Iga K , Kitahara C , Suematsu Y 1979 *Jpn. J. Appl. Phys.* **18** 2329
- [6] Geels R S , Coldren L A 1990 *Appl. Phys. Lett.* **57** 1605
- [7] Karim A , Bjorlin S , Piprek J et al 2000 *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **6** 1244
- [8] Supper D , Steinle G , Ilzhofer M et al 2006 *Semicond. Sci. Technol.* **21** 1464
- [9] Pougeoise E , Gilet P , Grosse P , Poncet S , Chelnokov A , Gerard J M , Bourgeois G , Stevens R , Hamelin R , Hammar M , Berggren J , Sundgren P 2006 *Electron. Lett.* **42** 584
- [10] Anan T , Yamada M , Nishi K et al 2001 *Electron. Lett.* **37** 566
- [11] Ledentsov N , Bimberg D , Ustinov V M et al 2002 *Physica E* **13** 871
- [12] Shau R , Ortsiefer M , Rosskopf J , Bohm G , Kohler F , Amann M C 2001 *Electron. Lett.* **37** 1295
- [13] Feezell D , Buell D A , Coldren L A 2005 *Electron. Lett.* **41** 803
- [14] Jayaraman V , Mehta M , Jackson A W , Wu W , Okuno Y 2003 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **15** 1495
- [15] Ishikawa T , Bowers J E 1994 *IEEE J. Quantum Electron.* **30** 562
- [16] Zhang Y G , Chen J X , Chen Y Q , Qi M , Li A Z , Fröjd K , Stoltz B 2001 *J. Crystal Growth* **227-228** 329
- [17] Black K A , Abraham P , Karim A , Bowers J E , Hu E L 1999 *11th International Conference on Indium Phosphide and Related Materials* **16-20** May 357
- [18] Chand N , Chu S N G 1990 *Appl. Phys. Lett.* **57** 1796
- [19] Lao Y F , Wu H Z 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 4334 (in Chinese)
[劳燕峰、吴惠桢 2005 物理学报 **54** 4334]
- [20] Almuneau G , Hall E , Nakagawa S , Kim J K , Lofgreen D , Sjolund O , Luo C , Clarke D R , English J H , Coldren L A 2000 *J. Vac. Sci. Technol. B* **18** 1601
- [21] Babic D I , Streubel K , Mirin R P , Margalit N M , Bowers J E , Hu E L , Mars D E , Yang L , Carey K 1995 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **7** 1225
- [22] Lei H P , Wu H Z , Lao Y F , Qi M , Li A Z , Shen W Z 2003 *J. Crystal Growth* **256** 96

Submilliampere threshold $1.3\text{ }\mu\text{m}$ vertical-cavity surface-emitting lasers^{*}

Lao Yan-Feng[†] Cao Chun-Fang Wu Hui-Zhen Cao Meng Gong Qian

(State Key Laboratory of Functional Materials for Informatics , Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology , Chinese Academy of Sciences , Shanghai 200050 , China)

(Received 23 August 2008 ; revised manuscript received 10 September 2008)

Abstract

We present the design and fabrication of $1.3\text{ }\mu\text{m}$ vertical-cavity surface-emitting lasers (VCSELs). This laser exhibits continuous-wave single-mode operation up to 82°C . The threshold current as low as 0.51 mA and a slope efficiency of 0.29 W/A have been achieved. This laser is composed of a wafer-bonded GaAs/Al(Ga)As distributed Bragg reflector (DBR) and a dielectric $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$ DBR with InAsP/InGaAsP strain-compensated multi-quantum wells grown in the cavity. The effect of cavity mode-gain offset on device performance is then discussed.

Keywords : vertical-cavity surface-emitting laser , wafer-direct bonding , strain-compensated multi-quantum well

PACC : 7280E , 4280S , 8115N

* Project supported by the State Key Development Program for Basic Research of China (Grant No. 2003CB314903).

† E-mail : lyflys@hotmail.com