

氧化孔径对高功率垂直腔面发射激光器温升的影响

刘 迪^{1,2} 宁永强¹ 秦 莉¹ 张金龙^{1,2} 张 星¹ 刘 云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中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要 为了在制作垂直腔面发射激光器(VCSEL)时选择合适的氧化孔径尺寸,以获得较好的光束质量和较高的输出功率,对具有不同氧化孔径的单管器件的热特性进行了实验研究。通过控制氧化时间,制作了氧化孔径分别为 415、386、316 μm 的单管器件,台面直径和 P 型接触电极直径均为 450 μm 和 400 μm 。针对 3 种器件在室温连续工作条件下不同的输出特性,对它们的热阻进行了实验测量,发现氧化孔径越小时器件热阻越大。通过对比电流、波长及温度的关系,得到了由电流引起的自热效应给 3 种器件带来的温升情况。注入电流为 1 A 时,氧化孔径为 415 μm 的器件温度为 32.4 $^{\circ}\text{C}$,氧化孔径为 386 μm 的器件温度为 35.2 $^{\circ}\text{C}$,氧化孔径为 316 μm 时,器件的温度高达 76.4 $^{\circ}\text{C}$ 。

关键词 激光器;垂直腔面发射激光器;氧化孔径;热阻;温升

中图分类号 TN248.4 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.0502005

Effect of Oxide Aperture on Temperature Rise in High Power Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser

Liu Di^{1,2} Ning Yongqiang¹ Qin Li¹ Zhang Jinlong^{1,2} Zhang Xing¹
Liu Yun¹ Wang Lijun¹

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

Abstract Thermal characteristics of single vertical-cavity surface-emitting laser (VCSEL) devices with different oxide apertures are studied experimentally in order to get better beam quality and higher output power by choosing appropriate size of the oxide aperture. Single devices with oxide apertures of 415, 386, and 316 μm are made by controlling the oxidation time. Diameters of the mesa and the P type contact are 450 μm and 400 μm , respectively. Thermal resistances of three kinds of devices are measured experimentally based on their different output characteristics under continuous-wave (CW) operation at room temperature. It is found that the smaller the oxide aperture is, the larger the thermal resistance of the device becomes. Temperature rise caused by self heating of injection current is obtained by comparing the relationship of current, wavelength and temperature. At a current of 1 A, the temperature of devices are 32.4 $^{\circ}\text{C}$, 35.2 $^{\circ}\text{C}$ and 76.4 $^{\circ}\text{C}$ corresponding to the oxide aperture of 415, 386, and 316 μm , respectively.

Key words lasers; vertical cavity surface emitting laser; oxide aperture; thermal resistance; temperature rise

OCIS codes 140.7260; 230.5590; 120.6780; 250.7260; 140.6810

1 引 言

近年来,随着半导体外延技术的发展以及器件

制作工艺技术的提高,高功率垂直腔面发射激光器(VCSEL)逐渐成为人们研究的热点^[1~3]。与高功

收稿日期: 2011-11-04; 收到修改稿日期: 2012-01-20

基金项目: 国家自然科学基金(51172225, 60876036, 61006054, 61106068)资助课题。

作者简介: 刘 迪(1984—),女,博士研究生,主要从事半导体光电子器件方面的研究。E-mail: liudi840424@163.com

导师简介: 宁永强(1965—),男,研究员,博士生导师,主要从事新型半导体激光器及其相关物理等方面的研究。

E-mail: ningyq@ciomp.ac.cn(通信联系人)

率边发射半导体激光器相比,高功率 VCSEL 由于其阈值电流低、输出光束发散角小、成本低等优点引起高速数据传输、高分辨率打印以及抽运固体激光器和光纤激光器等应用领域的广泛关注^[4,5]。增大 VCSEL 单管器件的出光口径是提高器件总输出功率的方法之一。在室温连续电流注入下,李特等^[6]制作的氧化孔径为 500 μm 的单管器件得到了 1.95 W 的最大输出功率。Otake 等^[7]研制了包含 5 个 InGaAs 量子阱的 VCSEL 单管器件,在 20 A 的脉冲电流注入下,最大峰值功率超过了 12.5 W。

对于氧化限制型 VCSEL 器件来说,氧化孔径的大小直接决定了有源区的有效面积尺寸,也决定了有源区内的电流分布情况^[8]。当出光口径相同而氧化孔径不同时,有源区内电流分布的差异会使由电流引起的自热效应对器件的影响也不同。电流密度越大时,器件的自热效应越严重,使得更多的电能转换成热量,导致电-光转换效率降低,引起功率热饱和现象,从而限制器件获得更高的功率输出。针对以上问题,本文制作了不同氧化孔径的 VCSEL 单管器件,对它们在室温连续工作条件下的输出特性进行了测试。并且测量了各器件的热阻,得到了在相同连续电流下器件的工作温度,同时分析了出光口径相同时氧化孔径大小与 VCSEL 单管器件热特性的关系,以此作为在制作高功率 VCSEL 器件时选择氧化孔径尺寸的依据。

2 器件结构及制作

图 1 是底发射 VCSEL 单管器件的结构示意图。VCSEL 外延片是利用金属氧化物化学气相沉积法(MOCVD)生长而成的。为了减小串联电阻,器件底部和顶部的分布布拉格反射镜(DBR)都由具有渐变层的 $Al_{0.9}Ga_{0.1}As/Al_{0.12}Ga_{0.88}As$ 周期重复性结构组成。其中 N 型 DBR 掺杂硅($2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$),周期为 22.5 对;P 型 DBR 掺杂碳($2.5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$),周期为 30.5 对。有源区包括 3 个 $In_{0.2}Ga_{0.8}As$ (6 nm)/ $GaAs_{0.92}P_{0.08}$ (8 nm)应变量子阱,分布在顶部和底部 DBR 之间。由于 $GaAs_{0.92}P_{0.08}$ 与 GaAs 相比具有更宽的带隙结构,因此将 $GaAs_{0.92}P_{0.08}$ 作为势垒可以更好地限制量子阱中的载流子,从而改善由于有源区温度升高而导致的阈值电流密度增加和效率下降等问题^[9]。有源区与两侧的 $Al_{0.3}Ga_{0.7}As$ 空间层构成一个波长的谐振腔,在空间层与 P 型 DBR 之间是厚度为 30 nm 的 $Al_{0.98}Ga_{0.02}As$ 层。

在经过外延片 P 面光刻出单管器件图形及湿

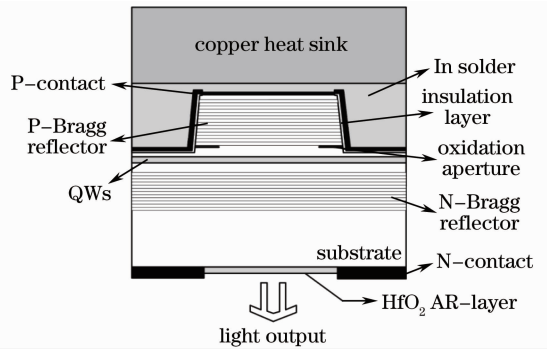


图 1 底发射 VCSEL 单管器件结构

Fig. 1 Structure diagram of a single bottom emitting VCSEL device

法腐蚀台面后,露出要进行氧化的 $Al_{0.98}Ga_{0.02}As$ 层。采用湿法选择氧化的方法,将一定流量的高纯氮气(1.5 L/min)通过加热的水(约 95 °C),携带一定量水蒸气进入恒温(420 °C)的氧化室。氧化室内放有待氧化的样品,水蒸气在气压作用下侧向扩散进入 $Al_{0.98}Ga_{0.02}As$ 层形成一个由低折射率(约为 1.6)的高阻氧化物 Al_xO_y 所包围的氧化孔径,从而对电流和光场提供有效的限制^[10]。为了观察选择氧化情况,氧化后利用磷酸过氧化氢腐蚀液将氧化层以上的结构腐蚀掉,从而直接观察氧化层。图 2 是氧化时间为 10 min 时氧化层的平面图(彩图请见网络电子版),图中的蓝色圆环即为低折射率的 Al_xO_y 绝缘氧化物,氧化深度约为 17.5 μm。

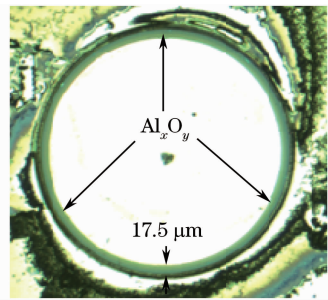


图 2 氧化 10 min 的氧化层平面图

Fig. 2 Planar graph of the oxide layer after oxidizing for 10 minutes

然后经过大面积生长 SiO_2 绝缘层、腐蚀台面电极区域内的 SiO_2 、大面积溅射 Ti-Pt-Au 作为 P 型电极、减薄衬底、光刻出光窗口、蒸镀 AuGeNi/Au 形成 N 面欧姆接触、窗口剥离(lift-off)、解理及将 P 面压焊在无氧铜热沉上等步骤完成 VCSEL 单管器件的制作^[11]。

3 器件温升的实验研究

3.1 氧化孔径不同时单管器件的热阻

利用不同的氧化时间,按第 2 节方法制作了具

有不同氧化孔径的 VCSEL 单管器件。不同的氧化时间所形成的氧化孔径大小如表 1 所示, 3 个单管器件的台面直径和 P 型接触电极直径都相等, 分别为 450 μm 和 400 μm 。

表 1 不同氧化时间对应的氧化孔径直径
Table 1 Diameters of the oxide aperture corresponding to different oxidizing time

| Oxidizing time /min | Oxide aperture / μm |
|---------------------|--------------------------------|
| 10 | 415 |
| 24 | 386 |
| 50 | 316 |

图 3 是在不同的室温连续工作电流下, 3 个 VCSEL 单管器件所表现出的伏安特性曲线 ($I-V$) 和输出功率特性 (L) 曲线。测得的各项特性参数如表 2 所示, 从中可以看出当氧化孔径大于 P 型接触电极时, 器件的阈值电流较大, 接近 1 A。当氧化孔径小于 P 型接触电极时, 器件的阈值电流明显降低, 并且氧化孔径越小阈值电流也越低。这是因为随着氧化孔径的减小, 对注入电流和光模式的限制作用越来越强, 使得由电流横向扩展、散射、衍射等

引起的损耗减小, 因此阈值电流随之降低。另外还可以看出, 氧化孔径最小的器件最先出现功率热饱和现象, 在注入电流为 3.6 A 时得到 1.08 W 的最大输出功率, 电-光转换效率为 11.1%。然而, 其他两个器件在 4 A 的注入电流下仍未出现热饱和现象, 此时的功率均为 1.35 W, 电-光转换效率均为 16.2%。这是因为在同样的注入电流下, 氧化孔径小的器件将更多的电能转换成了热量, 使得器件温升较快, 电-光转换效率降低, 并且输出功率更容易达到热饱和。

表 2 不同氧化孔径单管器件的输出特性参数
Table 2 Output characteristic parameters of single devices corresponding to different oxide apertures

| Oxide aperture / μm | Threshold current /A | Differential resistance / Ω | Electronic-optic efficiency /% |
|--------------------------------|----------------------|------------------------------------|--------------------------------|
| 415 | 0.92 | 0.09 | 16.2 |
| 386 | 0.66 | 0.08 | 16.2 |
| 316 | 0.20 | 0.10 | 11.1 |

根据半导体激光器的热效应理论, 激光器的热特性可以用热阻来描述。器件的热阻通常定义为器件温升和耗散功率的比值, 有^[12]

$$R_{th} = \frac{\Delta T}{\Delta P_{diss}}, \quad (1)$$

由于直接监测器件的温度比较困难, 所以利用

$$\frac{\Delta T}{\Delta P_{diss}} = \frac{\Delta \lambda}{\Delta P_{diss}} / \frac{\Delta \lambda}{\Delta T}, \quad (2)$$

将实验测得的出射波长随耗散功率变化的速率以及出射波长随温度变化的速率代入(2)式中, 就可以计算得到各个单管器件的热阻。

图 4~6 是 3 个单管器件的测量结果。在阈值以上时, 测量了不同耗散功率下器件的输出波长, 得到波长随耗散功率的变化速率 (nm/W)。为了得到

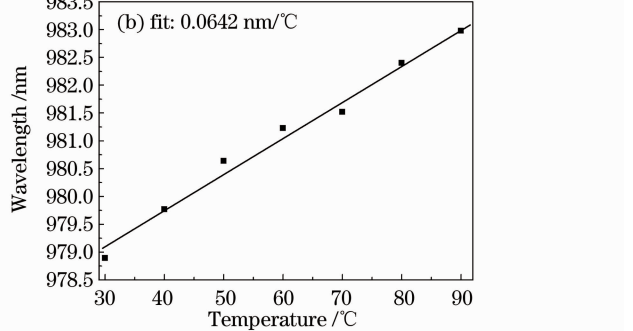


图 4 氧化孔径为 415 μm 的垂直腔面发射激光器热阻的测量结果。(a) 波长与耗散功率的函数关系; (b) 不同温度下的波长

Fig. 4 Thermal impedance measurement results for VCSEL with 415 μm oxide aperture. (a) Wavelength as a function of dissipated power; (b) wavelengths at different temperatures

波长随温度变化的速率($\text{nm}/^\circ\text{C}$),在脉宽为 240 ns, 占空比为 0.002%的脉冲工作条件下测量不同温度时器件的输出波长,器件的温度由热电制冷器(TEC)来控制。对于直径为 400 μm 的 P 型接触电极,当氧化孔径为 415 μm 和 386 μm 时,两个单管器件的波长随温度的变化相差不大。而当氧化孔径与电极直径相比过小时,例如氧化孔径为 316 μm

的器件,其波长随温度的变化速率比前两者都要大。另外,从测量结果可以看到氧化孔径越小的器件,其波长随耗散功率的变化速率越大。由此推断在连续工作条件下随着注入电流的增大,氧化孔径越小的器件温升越高。利用(2)式,经过计算得到了 3 个单管器件的热阻,如表 3 所示。通过比较结果得出,氧化孔径越小,器件的热阻越大,热特性越差。

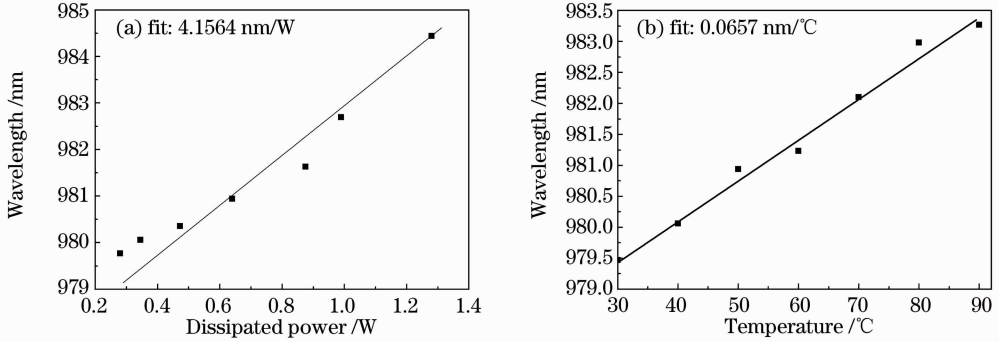


图 5 氧化孔径为 386 μm 的垂直腔面发射激光器热阻的测量结果。(a)波长与耗散功率的函数关系; (b)不同温度下的波长

Fig. 5 Thermal impedance measurement results for VCSEL with 386 μm oxide aperture. (a) Wavelength as a function of dissipated power; (b) wavelengths at different temperatures

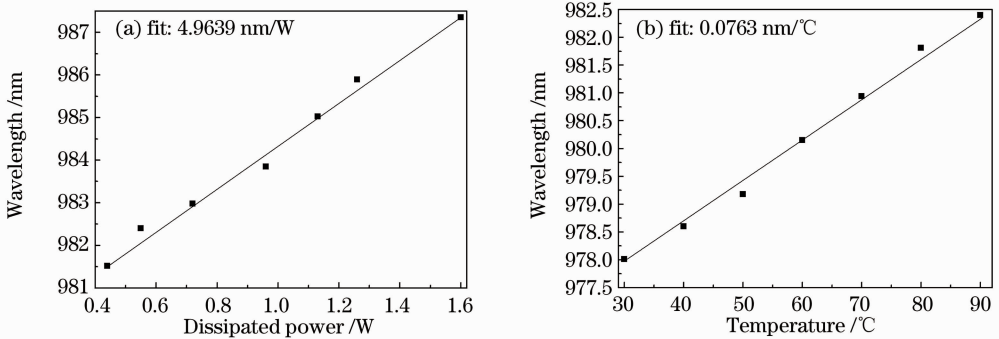


图 6 氧化孔径为 316 μm 的垂直腔面发射激光器热阻的测量结果。(a)波长与耗散功率的函数关系; (b)不同温度下的波长

Fig. 6 Thermal impedance measurement results for VCSEL with 316 μm oxide aperture. (a) Wavelength as a function of dissipated power; (b) wavelengths at different temperatures

表 3 氧化孔径不同时单管器件的热阻

Table 3 Thermal resistance of the single device corresponding to different oxide apertuers

| Oxide aperture / μm | Thermal resistance /($^\circ\text{C}/\text{W}$) |
|--------------------------------|---|
| 415 | 57.83 |
| 386 | 63.26 |
| 316 | 65.06 |

3.2 3 种器件的温升比较

图 7 是 3 个氧化孔径单管器件的电流-波长和温度-波长曲线。通过比较得到了室温下不同连续工作电流时,3 个器件的温升情况,如图 8 所示。可见在相同的连续工作电流下,当氧化孔径越小时,由

自热效应引起的器件温度越高。对于直径为 400 μm 的 P 型接触电极,当氧化孔径为 415 μm (稍大于 P 型电极)和 386 μm (稍小于 P 型电极)时,器件的温度相差不大。注入电流为 1 A 时,前者的温度为 32.4 $^\circ\text{C}$,后者的温度为 35.2 $^\circ\text{C}$ 。当氧化孔径为 316 μm 时,同样在 1 A 的注入电流下,器件的温度高达 76.4 $^\circ\text{C}$ 。这是因为有源区中的电流密度分布由氧化孔径决定,当注入电流相同时,氧化孔径越小使得有源区激活区域的电流密度越大。VCSEL 器件的热源之一量子阱的发热可以近似表示为^[13]

$$Q_{\text{qw}} = \frac{1 - \eta_{\text{sp}} f_{\text{sp}}}{d_{\text{qw}} \beta} \ln \frac{j(r)}{j_s} \{ j_{\text{th}} +$$

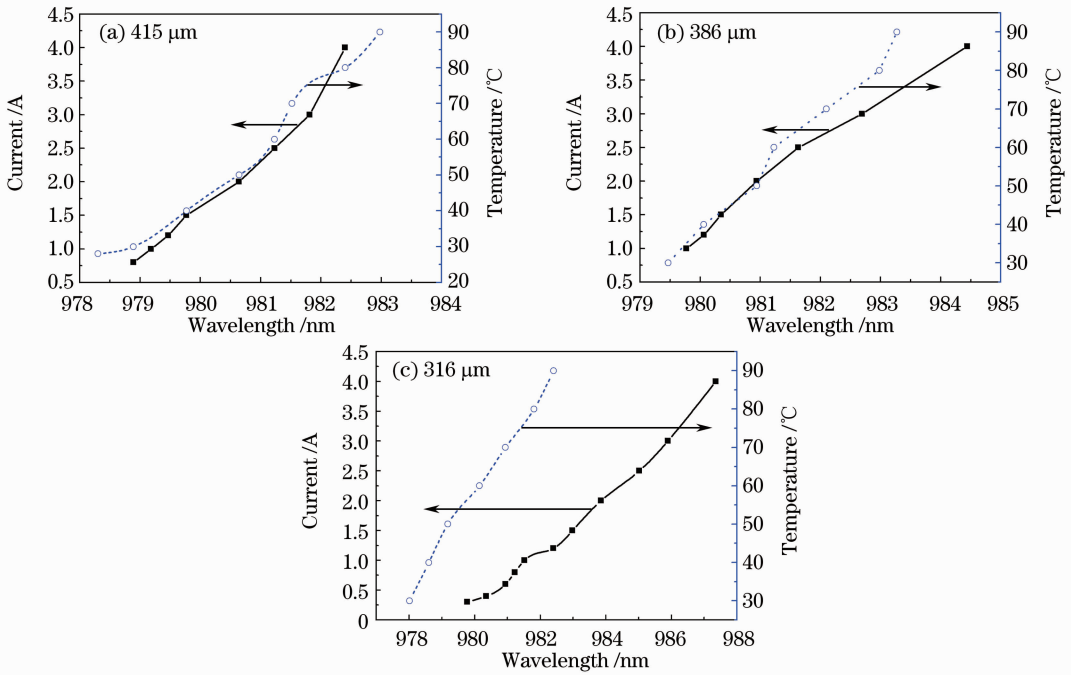


图 7 氧化孔径不同时单管器件的电流-波长-温度曲线

Fig. 7 Current-wavelength-temperature curves for single device with different oxide apertures

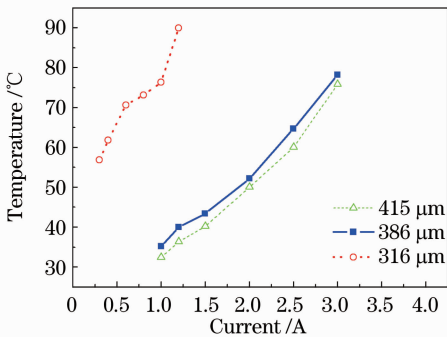


图 8 不同氧化孔径的单管器件在各连续工作电流下的温度

Fig. 8 Temperature of single device with different oxide apertures at various injection currents

$$[j(r) - j_{th}](1 - \eta_i), \quad (3)$$

式中 η_{sp} 和 η_i 分别是自发发射和受激发射的内量子效率, f_{sp} 是自发发射光子从有源区逃逸的因子, j_{th} 是阈值电流密度, $j(r)$ 是有源区的电流密度, d_{QW} 是有源区的厚度, j_s 是 PN 结上的反向饱和电流密度。另外, 空间层、衬底和 DBR 的发热主要是焦耳热, 可以表示为

$$Q = j^2(r)\rho, \quad (4)$$

式中 ρ 是各部分的电阻率。由(3)、(4)式可以看出, 当电流密度越大时, 热源发热越严重, 从而导致器件温度越高。

对于高功率 VCSEL 器件来说, 氧化孔径可以很好地对电流和光模式进行限制。但是, 氧化孔径

的大小直接决定了有源区激活区域的直径尺寸。在同一工作电流下, 激活区直径越小, 器件的温度越高, 当电流增加时, 器件的温度上升也越快; 反之, 在同一工作电流下, 激活区直径越大, 器件的温度越低, 当电流增加时, 器件的温度上升也越小。这就意味着, 激活区直径越大即氧化孔径越大越有利于器件的散热, 从而有利于提高高功率 VCSEL 器件的效率。但是, 氧化孔径越大也会使得器件的阈值电流增大。因此, 在制作器件时选择合适的氧化孔径大小对保证获得较好的器件输出性能以及提高器件效率是至关重要的。

4 结 论

通过控制氧化时间, 制作了氧化孔径分别为 415、386、316 μm 的高功率垂直腔面发射单管器件, 台面直径和 P 型接触电极直径均为 450 μm 和 400 μm 。在室温连续工作条件下, 氧化孔径为 415 μm 和 386 μm 的器件在注入电流为 4 A 时输出功率都达到了 1.35 W, 电-光转换效率都在 16% 以上, 并且此时功率没有发生热饱和。而氧化孔径为 316 μm 的器件在注入电流为 3.6 A 时就出现了热饱和现象, 最大输出功率为 1.08 W, 电-光转换效率为 11.1%, 均低于前两者。继而对 3 种器件的热阻进行了实验测量, 得到氧化孔径越小, 器件的热阻越大。通过对比电流、波长及温度的关系, 得到由电流

引起的自热效应给 3 个器件带来的温升情况。注入电流为 1 A 时,氧化孔径为 415 μm 的器件温度为 32.4 $^{\circ}\text{C}$,氧化孔径为 386 μm 的器件温度为 35.2 $^{\circ}\text{C}$,氧化孔径为 316 μm 时,器件的温度高达 76.4 $^{\circ}\text{C}$ 。

参 考 文 献

- 1 Jinjiang Cui, Yongqiang Ning, Yan Zhang *et al.*. Design and characterization of a nonuniform linear vertical-cavity surface-emitting laser array with a Gaussian far-field distribution[J]. *Appl. Opt.*, 2009, **48**(18): 3317~3321
- 2 Zhao Yingjie, Hao Yongqin, Li Guangjun *et al.*. Fabrication of new structure vertical-cavity surface-emitting laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(8): 1946~1950
赵英杰, 郝永芹, 李广军等. 新型结构垂直腔面发射激光器的研制[J]. *中国激光*, 2009, **36**(8): 1946~1950
- 3 Changling Yan, Yongqiang Ning, Li Qin *et al.*. High-power vertical-cavity surface-emitting laser with an extra Au layer[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2005, **17**(8): 1599~1601
- 4 M. C. Amann, M. Ortsiefer, R. Shau *et al.*. Vertical-cavity surface-emitting laser diodes for telecommunication wavelengths [C]. *SPIE*, 2002, **4871**: 123~129
- 5 I. G. A. Kenichi. Vertical-cavity surface-emitting laser: its conception and evolution [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2008, **47**(1): 1~10
- 6 Te Li, Yongqiang Ning, Yanfang Sun *et al.*. High-power InGaAs VCSEL's single devices and 2-D arrays[J]. *Journal of Luminescence*, 2007, **122-123**: 571~573
- 7 N. Otake, K. Abe, H. Yamada *et al.*. High-power vertical-cavity surface-emitting laser under a short pulsed operation[J]. *Appl. Phys. Express*, 2009, **2**(5): 052102
- 8 Craig Angelos, Steven Hinckley, Rainer Michalzik *et al.*. Simulation of current spreading in bottom-emitting vertical cavity surface emitting lasers for high power operation [C]. *SPIE*, 2004, **5277**: 261~272
- 9 Zhang Yan, Ning Yongqiang, Wang Ye *et al.*. High power vertical-cavity surface-emitting laser array with small divergence [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(9): 2428~2432
张岩, 宁永强, 王焯等. 高功率低发散角垂直腔面发射激光器阵列[J]. *中国激光*, 2010, **37**(9): 2428~2432
- 10 Hou Lifeng, Zhong Jingchang, Zhao Yingjie *et al.*. Law of wet oxidation rate in vertical-cavity surface-emitting lasers [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(4): 790~793
侯立峰, 钟景昌, 赵英杰等. 垂直腔面发射激光器的湿法氧化速率规律[J]. *中国激光*, 2009, **36**(4): 790~793
- 11 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
- 12 Michael H. MacDougall, Jon Geske, Chao-Kun Lin *et al.*. Thermal impedance of VCSEL's with AlO_x -GaAs DBR's [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1998, **10**(1): 15~17
- 13 Y. G. Zhao, J. G. Mconerney. Transient temperature response of vertical-cavity surface-emitting semiconductor lasers[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1995, **3**(9): 1668~1673

栏目编辑:宋梅梅