

文章编号: 0258-7025(2010)09-2428-05

高功率低发散角垂直腔面发射激光器阵列

张 岩^{1,2} 宁永强¹ 王 烨^{1,2} 刘光裕^{1,2} 史晶晶^{1,2} 张 星^{1,2} 王贞福^{1,2}
秦 莉¹ 孙艳芳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 报道了 980 nm 高功率低发散角垂直腔面发射激光器(VCSEL)阵列。通过增大阵列单元的出光孔径和单元间距来减小阵列器件的电阻和热阻,制作的台面为直径 250 μm ,氧化孔径 200 μm ,单元间距 280 μm 的 4 \times 4 二维阵列,与有源区面积相同的单管器件相比具有更高的输出功率。在室温连续工作条件下,阵列在注入电流 6 A 时最高输出功率为 1.81 W,阈值电流为 1.2 A,斜率效率为 0.37 W/A,微分电阻为 0.01 Ω 。针对较大的远场发散角对单元器件有源区中电流密度分布进行了计算,分析了器件高阶横模产生的原因。使用镀制额外金层的结构来改善远场发散角,将半角宽度由 30 $^\circ$ 压缩到 15 $^\circ$ 以下,改进后器件的输出功率略有下降。60 $^\circ\text{C}$ 恒电流模式寿命测试结果显示器件在 800 h 后输出功率衰减小于 10%。

关键词 激光器;垂直腔面发射激光器;阵列;高功率;远场发散角

中图分类号 TN248.4 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20103709.2428

High Power Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser Array with Small Divergence

Zhang Yan^{1,2} Ning Yongqiang¹ Wang Ye^{1,2} Liu Guangyu^{1,2} Shi Jingjing^{1,2}
Zhang Xing^{1,2} Wang Zhenfu^{1,2} Qin Li¹ Sun Yanfang¹ Liu Yun¹ Wang Lijun¹

(¹Key Laboratory of Excited State Processes, 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 High power vertical cavity surface emitting laser (VCSEL) array with small divergence angle is reported. By choosing the large aperture size and enlarging the centre spacing of the elements, the resistance and thermal resistance of the array are reduced. The two-dimensional 4 \times 4 array with element mesa diameter of 250 μm , oxide aperture of 200 μm and center to center spacing of 280 μm has a higher output power than that of the single device which has the same active area. The maximum output power is 1.81 W at a current of 6 A at room temperature. The threshold current is 1.2 A with a slop efficiency of 0.37 W/A, and the differential resistance is 0.01 Ω . The causes of the higher order transverse mode in the array element are analyzed by simulating the current density profiles in the active region. The far-field divergence angle is suppressed from 30 $^\circ$ to less than 15 $^\circ$ by using an extra Au layer. There is a slight drop in output power due to the introduction of the extra Au layer. The aging test is carried out under constant current mode at 60 $^\circ\text{C}$ and the result shows that the total degradation of output power is less than 10% after 800 h.

Key words lasers; vertical cavity surface emitting lasers; array; high power; far-field divergence angle

收稿日期: 2010-04-16; 收到修改稿日期: 2010-06-24

基金项目: 国家自然科学基金(60636020, 60676034, 60706007, 10974012, 60876036 和 90923037)、吉林省科技发展项目(20080335 和 20080516)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: 张 岩(1982—),男,博士研究生,主要从事半导体光电子器件方面的研究。E-mail: qhdzhangyan@126.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方面的研究。

E-mail: ningyq@ciomp.ac.cn

1 引言

随着半导体外延技术的发展、器件设计和制作工艺水平的提高,广泛应用于光通信、光互连、光存储和光信息处理等领域的垂直腔面发射激光器(VCSEL)有了很大的发展^[1~3],输出功率不断提高,使 VCSEL 成为潜在的可以提供高功率输出的激光光源之一^[4~6]。与高功率边发射激光器相比,高功率 VCSEL 有许多独特的优势:可以使用与单管器件几乎相同的工艺来制作阵列器件,可以很容易地制成二维(2D)面阵;散热结构简单,可以减小整个激光系统的体积和重量;在实现高功率密度输出时不受光学灾变损伤的影响,可靠性优于边发射激光器;出射光斑为圆形对称光斑,没有像散,大大降低了光束整形及光束耦合的成本,与光纤耦合效率高;波长稳定性好,增加了固体或光纤材料对抽运光的吸收效率。正因具有如此多的优势,才使得人们不断致力于提高 VCSEL 器件的输出功率^[7,8]。

为了提高器件的输出功率,一个最简单的途径是增大器件的出光孔径,但是器件的电-光转换效率随出光孔径的增大而减小^[9],随工作电流的增加绝大部分电能转化为热能,使有源区温度迅速升高,阻碍了器件获得更高的输出功率,同时大出光孔径器件的高阶横模激射在远场中产生环形光斑,增大了远场发散角,不利于光纤耦合^[10]。另一种方法就是用小孔径的发光单元制成单片的二维阵列,集成度高,结构紧凑,制作简单。但是小孔径器件具有较高的热阻和电阻,同时高密度的排列方式更加剧了单元间的热串扰^[11],降低了器件的电-光转换效率,使得二维阵列器件很容易发生热饱和,给集成更多单元获得更高功率输出带来极大的困难。针对以上问题,本文通过增大单元的出光孔径和单元间距来改善 VCSEL 阵列的电阻和热阻,制作的 4×4 二维阵列在室温连续工作条件下,最高输出功率达到 1.81 W。对单元器件有源区中的电流密度分布进行了计算,发现器件远场中的高阶横模是由氧化孔径周围的电流聚集效应造成的。采用镀制额外金层的结构将高阶横模滤掉,从而降低了器件的远场发射角,同时输出功率也略有下降。800 h 恒电流寿命测试后器件的输出功率衰减小于 10%。

2 器件结构与制作

图 1 是 VCSEL 阵列单元器件的结构示意图。VCSEL 外延片使用金属氧化物化学气相沉积法

(MOCVD)生长而成。有源区由 3 个 $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ (8 nm)/ $\text{GaAs}_{0.9}\text{P}_{0.1}$ (10 nm) 量子阱组成,设计激光波长为 980 nm,与传统的 GaAs 势垒层相比, $\text{GaAs}_{0.9}\text{P}_{0.1}$ 更宽的带隙可以使 InGaAs 阱中的载流子得到更好的限制,避免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,保证阵列在自热效应下也能获得高功率的输出,有源区与两侧的 $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ 组成一个波长的谐振腔。P 型分布布拉格反射镜(DBR)由 30.5 对碳($2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$)掺杂的 $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}/\text{GaAs}$ 组成,提供 99.9% 的反射率,N 型 DBR 由 21.5 对硅($1.5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$)掺杂的 $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}/\text{GaAs}$ 组成,提供 99.3% 的反射率。30 nm 厚的 $\text{Al}_{0.02}\text{Ga}_{0.98}\text{As}$ 层位于 P 型 DBR 与空间层之间,经选择氧化后形成低折射率的高阻氧化物 Al_xO_y ,提供对电流和光场的有效限制^[12]。

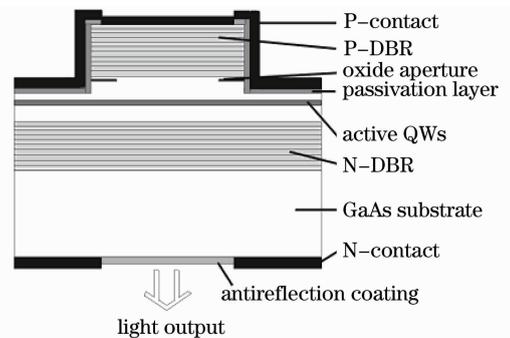


图 1 底发射 VCSEL 器件结构

Fig. 1 Structure diagram of a bottom emitting VCSEL

用光刻法在外延片 P 表面制作出器件图形,使用湿法腐蚀的方法制作台面,腐蚀深度刚刚到达有源区即可。在 $420 \text{ }^\circ\text{C}$ 石英炉内由氮气携带 $95 \text{ }^\circ\text{C}$ 水蒸气对 $\text{Al}_{0.02}\text{Ga}_{0.98}\text{As}$ 层进行选择氧化形成氧化孔径,氧化深度为 $25 \text{ } \mu\text{m}$ 。大面积生长 SiO_2 绝缘膜防止焊接时器件发生短路。刻蚀掉台面上的 SiO_2 膜后制作 Ti-Pt-Au 电极。为了减少吸收损耗,将 N 型 GaAs 衬底减薄,抛光至 $150 \text{ } \mu\text{m}$ 左右。采用双面对准光刻工艺将出光窗口图形与 P 面的台面对齐,制作 AuGeNi/Au 形成 N 面电极,并在出光窗口上制作单层 HfO_2 增透膜。采用倒装焊的方式使用钎焊料将解理后的管芯压焊在无氧铜热沉上。

3 测试结果与分析

室温连续工作下,台面直径 $250 \text{ } \mu\text{m}$,氧化孔径 $200 \text{ } \mu\text{m}$,单元间距 $280 \text{ } \mu\text{m}$ 的 4×4 二维阵列的 $P-I$ 和 $V-I$ 曲线如图 2 中实线所示。可见在注入电流为

6 A 时器件的最高输出功率达到 1.81 W, 没有出现热饱和现象。这是因为阵列单元是并联驱动的, 每个单元在相对较低的工作电流下产生的焦耳热没有使器件发生热饱和, 同时较大的单元直径和单元间距有效降低了 VCSEL 阵列器件的电阻和热阻, 更利于获得高功率输出。器件的阈值电流为 1.2 A, 斜率效率 0.37 W/A, 微分电阻 0.01 Ω , 在最高输出功率处电-光转换效率为 17.5%。为了说明此阵列器件更利于高功率输出, 使用相同的外延片同批制作了台面直径 850 μm , 氧化孔径 800 μm 的单管器件, 室温连续工作下的 P - I 和 V - I 曲线如图 2 中的虚线所示。可见因与阵列具有相同的有源区面积阈值电流 1.2 A, 单管器件不受热串扰的影响, 其斜率效率高于阵列器件, 为 0.47 W/A。但是因 VCSEL 器件的电-光转换效率随出光孔径的增大而降低, 同时单管器件的工作电流远大于阵列单元的工作电流, 且单管器件的微分电阻 (0.03 Ω) 更大, 这些使得单管器件中更多的电能转换为热能, 使有源区温度迅速升高, 器件在 5 A 时就发生了热饱和现象, 最高输出功率为 1.46 W, 电-光转换效率仅为 13.9%。

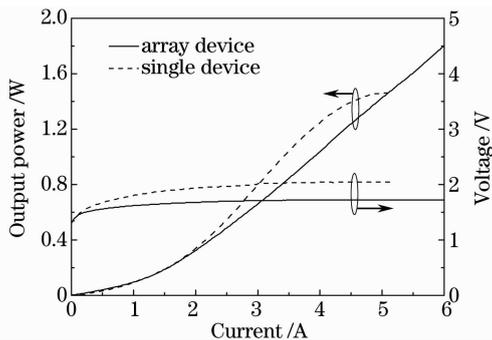


图 2 VCSEL 单管及阵列的 P - I 和 V - I 曲线

Fig. 2 P - I , V - I characteristics of the VCSEL single and two-dimensional (2D) array devices

图 3 是单管和阵列器件在最高输出功率时的光谱特性。单管器件激光中心波长为 984.6 nm, 半峰全宽为 0.9 nm, 阵列器件的中心波长为 981.0 nm, 半峰全宽为 0.7 nm。可见单管器件的波长红移大于阵列, 说明阵列器件有源区的温升较低, 有利于高功率输出。

增大阵列单元出光孔径的不利因素是随出光孔径的增大, 高阶横模获得激射, 使得由单元器件的远场分布叠加而成的阵列远场分布中出现环形光斑, 增大了阵列的远场发散角, 半角宽度达 30° 以上。图 4 是在不同注入电流时阵列的远场发散角, 在远场中都出现了由高阶横模组成的环形光斑, 其中的插图是使用 CCD 拍摄的 6 A 电流时的光斑图片。

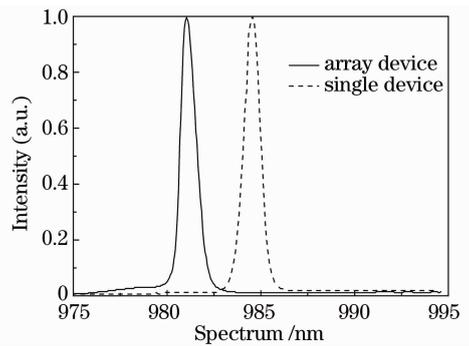


图 3 VCSEL 单管及阵列的光谱特性

Fig. 3 Spectra of the VCSEL single and 2D array devices

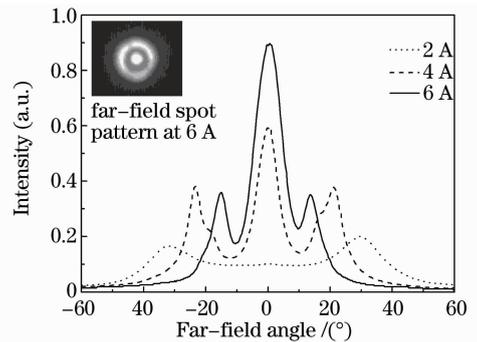


图 4 VCSEL 阵列的远场发散角

Fig. 4 Far-field divergence angles of the VCSEL array

对单元器件有源区中的电流密度分布进行了计算来分析高阶横模激射的原因。计算电流密度分布的泊松方程为^[13]

$$\nabla \cdot (\sigma \cdot \nabla \cdot U) = 0,$$

式中 σ 为电导率, U 为电势。在计算中选用柱坐标, 设定坐标原点在 VCSEL 器件 P 面电极的中心, Z 方向垂直于出光窗口并指向衬底。电流从 P 面接触电极注入, 通过 P 型 DBR, 有源区, N 型 DBR 流向 N 面接触电极。

计算的台面直径 250 μm , 氧化孔径 200 μm 阵列单元有源区中的电流密度分布如图 5 所示。可见电流密度分布由氧化孔径决定, 在有源区中心部分电流密度分布较均匀, 但在氧化孔径周围电流密度大大高于有源区中心区域, 这种电流聚集效应使得高阶横模在较小的电流下就能获得激射, 因此在小电流时阵列远场为环形光斑, 如图 4 中 2 A 的情况。随注入电流的增加, 有源区中心处较低的模式才开始激射, 与高阶横模一起组成阵列的远场光斑, 如图 4 中 6 A 的情况。同时由图 5 可见, 较高电流密度出现在氧化孔径边缘约 10 μm 处。为了抑制高阶横模, 降低远场发散角, 在器件制作中镀制一层额外的金层, 将高阶横模滤掉。图 6 是镀制额外金层

的器件结构示意图,此额外金层减小了器件的出光孔径,同时由于此金膜层对高阶横模起到滤光的作用,从而降低了器件的发散角,使用此种方法能够较好地改善大出光孔径单管器件的远场分布^[14]。采用标准的金属剥离工艺来制作额外的金层,将阵列单元的输出孔径由原来的 200 μm 减小到 180 μm 。

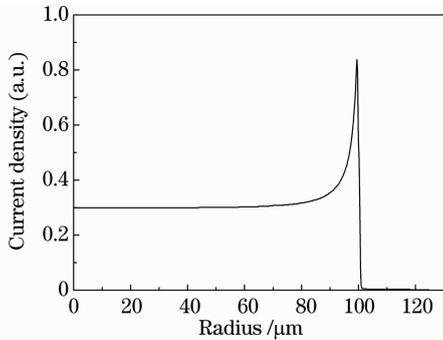


图 5 氧化孔径为 200 μm 的阵列单元的有源区中电流密度分布

Fig. 5 Current density profiles for array element with 200 μm oxide aperture diameter

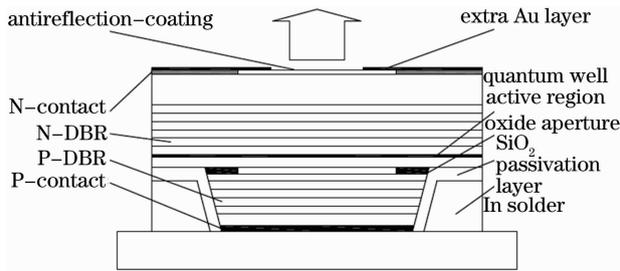


图 6 镀制额外金层的器件结构示意图

Fig. 6 Structure diagram of a VCSEL with an extra Au layer

图 7 是制作的镀制额外金层后 VCSEL 阵列的远场发散角。在 0~6 A 的工作电流下均能实现远场的近似高斯型分布,且远场发散角半角宽度小于 15°,图 7 中的插图是使用 CCD 拍摄的 6 A 电流时的光斑图片。这样的光束输出既提高了激光功率密度,也可以使用简单的准直聚焦装置耦合进光纤,从而获得广泛的应用。

图 8 是镀制额外金层前后 VCSEL 阵列的输出功率比较图。可见在改善远场发散角的同时,由于采用的额外金层对激光的散射和吸收的影响,阵列的最高输出功率略有下降,在 6 A 时输出功率为 1.61 W。

器件寿命是阻碍其应用的重要因素之一,采用高温恒电流模式对 VCSEL 阵列的寿命进行了测试。测试随机挑选了 6 只器件,在 60 $^{\circ}\text{C}$ 恒温箱中使用 3 A ($I = 2.5 I_{\text{th}}$) 电流驱动,记录下器件的平均功

率,测试开始时平均功率约为 0.6 W。图 9 是输出功率随时间的变化曲线,经过 800 h 寿命测试后,输出功率衰减在 10% 以内。

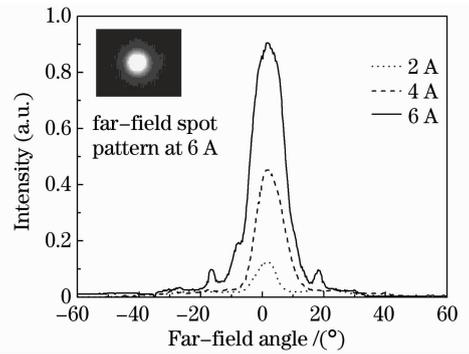


图 7 镀制额外金层后 VCSEL 阵列的远场发散角

Fig. 7 Far-field divergence angle of VCSEL array with an extra Au layer

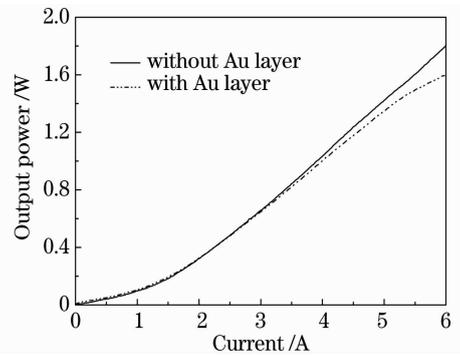


图 8 镀制额外金层前后 VCSEL 阵列的输出功率比较

Fig. 8 Comparison of output power characteristics between VCSEL arrays with and without an extra Au layer

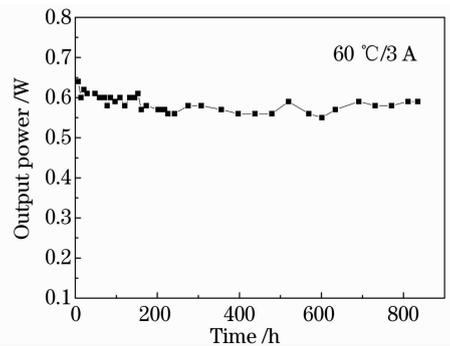


图 9 VCSEL 阵列的寿命测试

Fig. 9 Aging test of VCSEL array

4 结 论

通过增大单元的输出孔径和单元间距来减小 VCSEL 阵列器件的电阻和热阻,与具有相同有源区面积的单管器件相比,制作的台面直径为 250 μm ,氧化孔径为 200 μm ,单元间距为 280 μm 的 4 \times 4 二

维阵列具有更高的输出功率及电-光转换效率。在室温连续工作条件下,器件在 6 A 时最高输出功率为 1.81 W。增大的出光孔径使器件产生高阶横模激射,增大了阵列的远场发散角。对阵列单元器件有源区中电流密度分布进行了模拟计算,得出在氧化孔径周围的电流密度远高于有源区中心区域,这种电流聚集效应使得高阶横模在较小的电流下就能获得激射。采用镀制额外金层的结构将高阶横模滤掉,阵列器件远场发散角半角宽度由 30° 压缩到 15° 以下,改进后器件的输出功率略有下降。60 $^\circ\text{C}$ 恒电流模式寿命测试结果显示器件在 800 h 后输出功率衰减小于 10%。

参 考 文 献

- 1 I. G. A. Kenichi. Vertical-cavity surface-emitting laser: its conception and evolution [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2008, **47**(1): 1~10
- 2 B. Weigl, M. Grabherr, C. Jung *et al.*. High-performance oxide-confined GaAs VCSELs [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 1997, **3**: 409~415
- 3 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
- 4 Zhang Yan, Ning Yongqiang, Wang Ye *et al.*. A linear array of 980 nm VCSEL and its high temperature operation characteristics [J]. *Journal of Semiconductors*, 2009, **30**(11): 114008
- 5 Jean Francois Seurin, Guoyang Xu, Viktor Khalfin *et al.*. Progress in high-power high-efficiency VCSEL arrays [C]. *SPIE*, 2009, **7229**: 722903
- 6 Cui Jinjiang, Ning Yongqiang, Zhang Yan *et al.*. High beam quality novel vertical cavity surface emitting laser array [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(8): 1941~1945
崔锦江, 宁永强, 张岩等. 高光束质量新型垂直腔面发射激光器阵列 [J]. *中国激光*, 2009, **36**(8): 1941~1945
- 7 Weng W. Chow, Kent D. Choquette, Mary 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
- 8 Jean Francois Seurin, Guoyang Xu, James D. Wynn *et al.*. High-power vertical-cavity surface-emitting laser pump sources [J]. *IEEE Leos Newsletter*, 2007, **21**(4): 28~32
- 9 Jean Francois Seurin, Chuni L. Ghosh, Viktor Khalfin *et al.*. High-power high-efficiency 2D VCSEL arrays [C]. *SPIE*, 2008, **6908**: 690809
- 10 Li Te, Ning Yongqiang, Sun Yanfang *et al.*. Beam quality of 980 nm high power vertical-cavity surface-emitting laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(5): 641~645
李特, 宁永强, 孙艳芳等. 980 nm 高功率 VCSEL 的光束质量 [J]. *中国激光*, 2007, **34**(5): 641~645
- 11 Martin Grabherr, Michael Miller, Roland Jager *et al.*. High-power VCSEL's: single devices and densely packed 2 D-arrays [J]. *IEEE Sel. Top. Quantum Electron.*, 1999, **5**(3): 495~502
- 12 Ma Jianli, Hao Yongqin, Zhong Jingchang *et al.*. Study on stability of selective oxidation in vertical cavity surface emitting laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(8): 1055~1058
马建立, 郝永芹, 钟景昌等. 垂直腔面发射激光器中选择性氧化工艺稳定性研究 [J]. *中国激光*, 2007, **34**(8): 1055~1058
- 13 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
- 14 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