

文章编号 1004-924X(2011)09-2014-09

980 nm 高功率垂直腔面发射 激光列阵的单元结构优化

张 星^{1,2}, 宁永强^{1*}, 曾玉刚¹, 秦 莉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: 为了提高 980 nm 垂直腔面发射激光器(VCSEL)列阵的整体性能, 对列阵单元器件的分布布拉格反射镜(DBR)的反射率进行了优化。分析了 DBR 的反射率与阈值电流, 输出功率及转换效率之间的关系, 在维持较低阈值电流的前提下适当调节了 N-DBR 的反射率, 使单元器件斜率效率得到了有效提高, 进而改善了 VCSEL 列阵的整体输出特性。优化 DBR 反射率后研制出的包含 64 个单元的 VCSEL 列阵器件在注入电流为 6 A 时的连续输出功率为 2.73 W; 在脉宽为 100 ns, 重复频率为 100 Hz 的 130 A 脉冲电流驱动下输出功率达到 115 W; 包含 300 个单元的列阵器件在注入电流为 18 A 时, 连续输出功率达到 5.26 W。对 N-DBR 反射率进行优化后, VCSEL 列阵的整体输出特性得到了有效改善。

关键词: 半导体激光器; 垂直腔面发射激光器; 结构优化; 分布布拉格反射镜

中图分类号: TN248.4 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20111909.2014

Optimization of element structure in 980 nm high-power vertical-cavity surface-emitting laser array

ZHANG Xing^{1,2}, NING Yong-qiang^{1*}, ZENG Yu-gang¹, QIN Li¹, LIU Yun¹, WANG Li-Jun¹

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,*
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

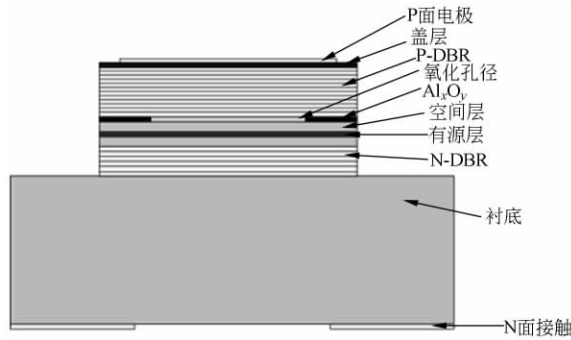
2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)*

** Corresponding author, E-mail: ningyq@ciomp.ac.cn*

Abstract: The reflectivity of a Distributed Bragg Reflector (DBR) was optimized to improve the output characteristics of a 980 nm Vertical-cavity Surface-emitting Laser (VCSEL) array. The relationship among the reflectivity of N-DBR, threshold current, output power and wall-plug efficiency was analyzed. Then, the reflectivity of N-DBR was adjusted to achieve higher slope efficiency in a relative low threshold current and to improve the overall output characteristics of the VCSEL array. After N-DBR reflectivity optimization, the developed VCSEL array including 64 elements can offer a CW output power of 2.73 W under the injected current of 6 A and a pulse output power of 115 W under the pulse

收稿日期: 2010-12-31; 修订日期: 2011-01-25.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 10974012, 60876036, 90923037, 11074247, 61006054, 6117045, 51172225, 61106047, 61106068)



(b) 列阵单元器件

(b) Element device of array

图 1 980 nm 高功率 VCSEL 列阵及其单元器件

Fig. 1 Schematic of 980 nm high-power VCSEL array and its element device

2.2 理论模型

2.2.1 阈值电流

VCSEL 是一种典型的多量子阱激光器,其阈值电流表达式为^[19]:

$$I_{th} = \frac{qN_w V_1 B N_{tr}^2}{\eta_i} \exp\left(\frac{2(\alpha_i + \alpha_m)}{N_w \Gamma_1 g_0}\right), \quad (1)$$

其中 η_i 为内量子效率; N_w 为量子阱的数量; V_1 为单个量子阱的体积; B 是双分子复合系数; N_{tr} 是透明载流子浓度; Γ_1 是单个量子阱的限制因子,对于有源区位于电场驻波中心位置的 VCSEL

而言, $\Gamma_1 = \Gamma_x \Gamma_y \Gamma_z = 2 \frac{L_a}{L}$; g_0 是增益常数; $\alpha_i = \frac{L_a \alpha_{ia} + L_p \alpha_{ip}}{L}$ 是腔内吸收系数; $\alpha_m = \frac{1}{L} \cdot$

$\ln\left(\frac{1}{\sqrt{R_1 R_2}}\right)$ 是镜面损耗,其中 R_1 及 R_2 分别代表 N-DBR 及 P-DBR 的反射率。

2.2.2 输出功率与转换效率

当 VCSEL 处于连续工作状态时,其输出功率会在很大程度上受到热效应的影响,此时输出功率表达式为:

$$P_{out} = \eta \frac{\alpha_m}{\alpha_i + \alpha_m} \frac{h\nu}{q} \frac{T_1}{(1-R_1) + \sqrt{\frac{R_1}{R_2}}(1-R_2)} (I - I_{th}) \left(1 - \frac{\Delta T}{T_{off}}\right), \quad (2)$$

其中 T_1 为 N-DBR 的透射率,如果 N-DBR 本身的吸收为 L_{DBR} (百分比),则 $T_1 = 1 - R_1 - L_{DBR}$ 。设 P_{in} 为总输入电功率,则 $P_{in} = I^2 R_s + IV_f$, 其中 R_s 为串联电阻, V_f 为开启电压。废功率 $P_D = P_{in}$

$-P$, 其中 $P = \eta \frac{\alpha_m}{\alpha_i + \alpha_m} \frac{h\nu}{q} (I - I_{th}) \left(1 - \frac{\Delta T}{T_{off}}\right)$ 为 VCSEL 通过两个镜面的总输出功率; 温升 $\Delta T = P_D R_T$, 其中 R_T 为热阻。当热沉平面非常接近于产生热量的区域的侧向维度时,可以假定热流为一维(这是一个非常粗略的近似,计算得出的热阻值是一个近似值), 此时有 $R_T = \frac{h}{\xi A}$, 其中 h 为热源到热沉的距离, A 为材料的热导率, A 为热源的面积。

转换效率的表达式为:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{\eta \frac{\alpha_m}{\alpha_i + \alpha_m} \frac{h\nu}{q} \frac{T_1}{(1-R_1) + \sqrt{\frac{R_1}{R_2}}(1-R_2)} (I - I_{th}) \left(1 - \frac{\Delta T}{T_{off}}\right)}{I^2 R_s + IV_f} \quad (3)$$

2.3 计算结果

根据 2.2 中的理论模型,本文计算了有源区直径不同的 VCSEL 列阵单元器件的阈值电流,输出功率及转换效率与 N-DBR 反射率的关系。计算中采用的器件材料和结构参数列于表 1:

表 1 材料及结构特性参数

Tab. 1 Material and structural parameters

参数符号	参数名称	值
η_i	内量子效率	1
q	电子电量	$1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$
N_w	量子阱个数	3
B	双分子复合系数	$10^{-10} \text{ cm}^3/\text{s}$
N_{tr}	透明载流子浓度	$1.7 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$
α_i	腔内吸收系数	10 cm^{-1}
Γ_1	单阱限制因子	0.04
g_0	增益系数	2100 cm^{-1}
R_2	P-DBR 反射率	99.9%
λ	波长	980 nm
L_{DBR}	N-DBR 吸收损耗	0.05%
V_f	开启电压	1.5 V
h	有源区到热沉的距离	5 μm
ξ	热导率	0.107 W/(cm · K)
T_{off}	截止温度	130 K

图 2 是计算得到的有源区直径不同的 VCSEL 列阵单元器件阈值电流与 N-DBR 反射率的关系。

由图 2 可见,有源区直径不同的单元器件,阈值电流随 N-DBR 反射率的降低提高的程度不

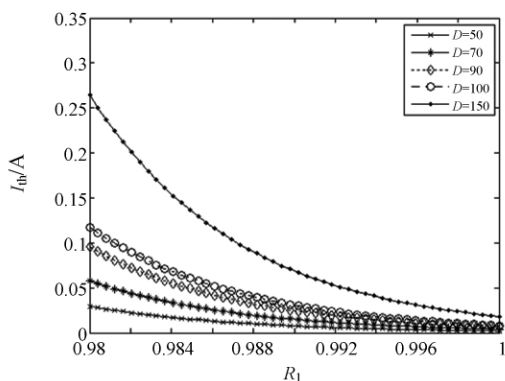
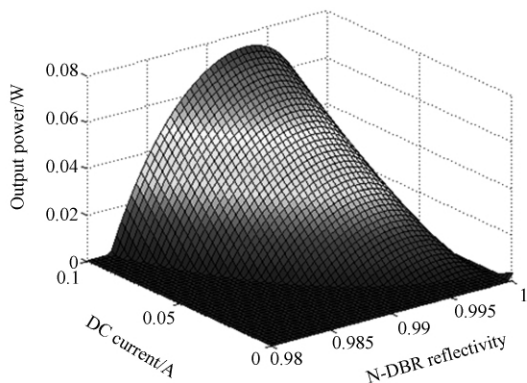


图 2 有源区直径不同的 VCSEL 列阵单元器件阈值电流与 N-DBR 反射率的关系

Fig. 2 Relationship between reflectivity of N-DBR and threshold current of VCSEL array elements with different active region diameters

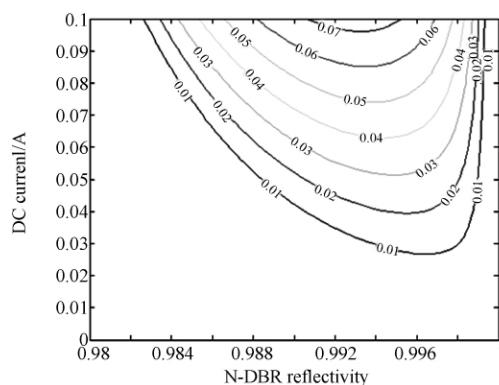
同。当 N-DBR 反射率为 99% 左右时,有源区直径为 100 μm 以下的单元器件阈值电流仍然在 0.03 A 以下,这样即使集成较多的器件组成列阵,阈值电流仍然会维持在较合理水平,因此,列阵器件的发光单元有源区直径最好在 100 μm 以下,从而使列阵器件整体阈值电流维持在较低水平。

图 3(a)(b)及(c)(d)是计算得到的,考虑了热效应影响时,口径为 100 μm 及 150 μm 的 VCSEL 列阵单元器件输出功率与 N-DBR 反射率及注入电流的关系。



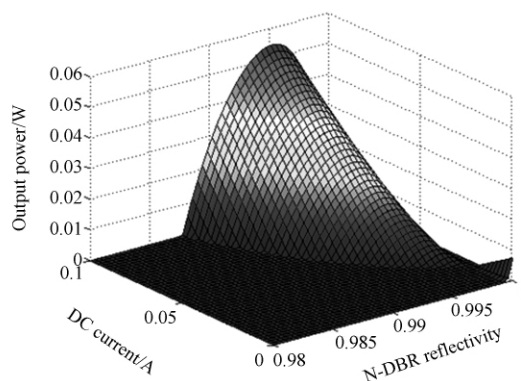
(a) 口径 100 μm 单元器件输出功率与 N-DBR 反射率及注入电流的关系

(a) Relationship between output characteristics and N-DBR reflectivity of 100-diameter-aperture element device



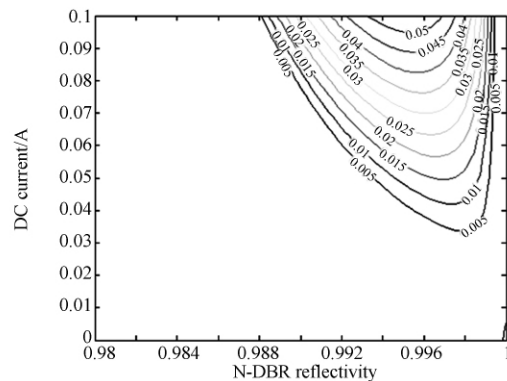
(b) 图(a)的平面等势图

(b) Isopotential map of (a)



(c) 口径 150 μm 单元器件输出功率与 N-DBR 反射率及注入电流的关系

(c) Relationship between output characteristics and N-DBR reflectivity of 150-diameter-aperture element device



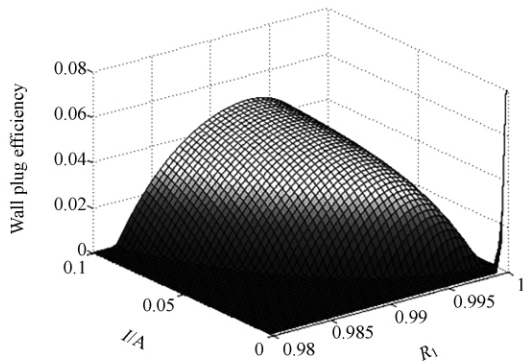
(d) 图(c)的平面等势图

(d) Isopotential map of (c)

图 3 口径为 100 μm 及 150 μm 的 VCSEL 列阵单元器件输出特性与 N-DBR 反射率的关系

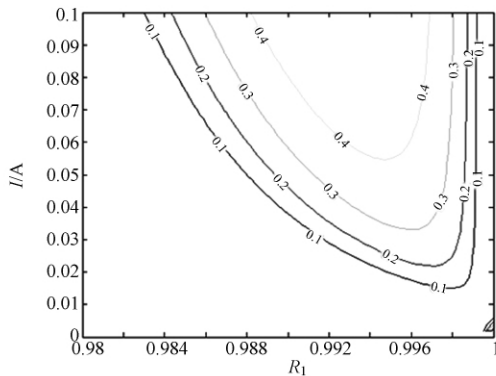
Fig. 3 Relationship between output characteristics and N-DBR reflectivities of VCSEL array elements with diameter-apertures of 100 μm and 150 μm

由图 3 可见,当考虑热效应影响时,口径不同的 VCSEL 列阵单元器件的输出特性与 N-DBR 反射率有不同的依赖关系。口径为 $100\ \mu\text{m}$ 的单元器件由于阈值电流能够始终维持较低水平,因此其输出特性能够在较宽的 N-DBR 反射率范围内得到优化,而口径为 $150\ \mu\text{m}$ 的器件对应的范围则较窄;同时虽然 VCSEL 列阵的整体注入电流较高,但每个单元器件的注入电流是有限的,对比图(a)及图(b)可见口径 $100\ \mu\text{m}$ 单元器件能够在较低的注入电流水平下达到较高输出功率水平。因此在这里将 VCSEL 列阵的单元器件直径选为 $100\ \mu\text{m}$,同时为了维持较低的阈值电流水平,将 N-DBR 反射率选为 99.2% 。



(a) 转换效率与注入电流及 N-DBR 反射率的关系

(a) Relationship among wall-plug efficiency, injected current density and reflectivity



(b) 平面等势图

(b) Isopotential map of (a)

图 4 口径为 $100\ \mu\text{m}$ 的 VCSEL 列阵单元器件转换效率与注入电流及 N-DBR 反射率的关系

Fig. 4 Relationship among wall-plug efficiency, injection current and reflectivity of N-DBR of VCSEL array element with $100\ \mu\text{m}$ -diameter-aperture

图 4 是计算得到的 VCSEL 列阵单元器件转换效率与 N-DBR 反射率及注入电流的关系。

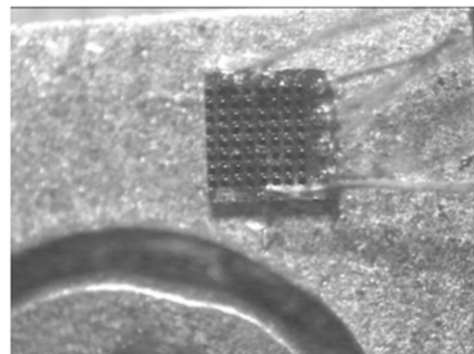
由图 4 可见,注入电流和 N-DBR 反射率都会对 VCSEL 的转换效率产生影响。与图 3 对比可以看出,在相同注入电流水平下,N-DBR 反射率对转换效率的影响与对输出功率的影响类似。

根据上述计算,我们可以得出如下结论:同时考虑较高的转换效率,较高输出功率及较低阈值电流三个因素,我们将 VCSEL 列阵单元器件的 N-DBR 反射率确定为 99.2% ,同时单元器件的有源区直径确定为 $100\ \mu\text{m}$ 。

3 980 nm 高功率 VCSEL 列阵研制

基于上述单元结构优化的结果,本文分别研制出具有 64 个发光单元的 8×8 VCSEL 列阵及具有 300 个发光单元的 10×30 VCSEL 列阵,列阵的发光单元直径均为 $100\ \mu\text{m}$,N-DBR 对数为 22 对,对应的中心反射率为 99.2% 。

器件制备的工艺流程如下:首先采用化学腐蚀方法在外延片 P 面刻蚀出圆形台面,刻蚀深度超过氧化限制层。进行侧氧化后,采用磁控溅射方法在 P 面生长 SiO_2 薄膜作为绝缘钝化层。随后将圆形台面上的 SiO_2 刻蚀掉并生长 Ti/Pt/Au 层形成电极接触。为了降低吸收损耗,将 N 面减薄,抛光到 $200\ \mu\text{m}$ 厚。通过双面对准在 N 面形成出光窗口后,在 N 面采用真空热蒸发法生长 AuGeNi/Au 来形成欧姆接触。管芯解理,初步筛选后焊接到铜热沉上之后进行性能测试。制成后的两种列阵示于图 5。



(a) 8×8 VCSEL 列阵

(a) 8×8 VCSEL array



(b) 10×30 VCSEL 列阵

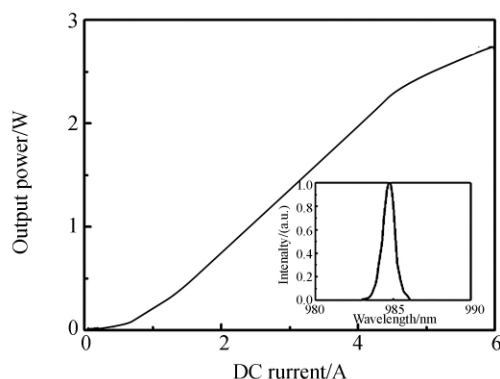
(b)10×30 VCSEL array

图 5 两种 VCSEL 列阵

Fig. 5 Two kinds of VCSEL arrays

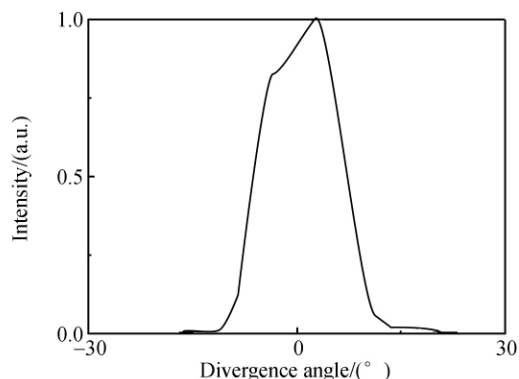
本文测试了具有 64 个发光单元的 8×8 VCSEL 列阵,测试结果分别示于图 6(a)及(b);同时未经单元结构优化,N-DBR 反射率为99.7%的器件测试结果示于图 7。由图 6 可见经过单元结构优化后的器件在连续注入电流为 6 A 时输出功率达到 2.73 W,阈值电流为 0.8 A,光谱半宽 0.7 nm,波长为 984 nm,远场发散角为 13.2°,与图 7 中未经过优化的器件测试结果相比,阈值电流有所增加,但最高输出功率从 2 W 提高至 2.73 W,说明其斜率效率有了明显提高。同时从测试结果中可以看出,在连续工作时,采用被动制冷模式会使器件很大程度上受到热效应的影响,在注入电流较高时会出现热饱和现象,输出波长也发生了漂移。

本文同时测试了窄脉冲驱动条件下的器件特性,测试得到的结果及光脉冲波形分别示于图 8 及图 9。驱动电源参数为:重复频率 100 Hz,脉



(a) 8×8 VCSEL 列阵的连续输出特性

(a)CW output characteristics of 8×8 VCSEL array



(b) 8×8 VCSEL 列阵的远场分布

(b) Far-field distribution of 8×8 VCSEL array

图 6 VCSEL 8×8 列阵的连续输出特性及远场分布

Fig. 6 CW output characteristic of 8×8 VCSEL array and its far-field distribution

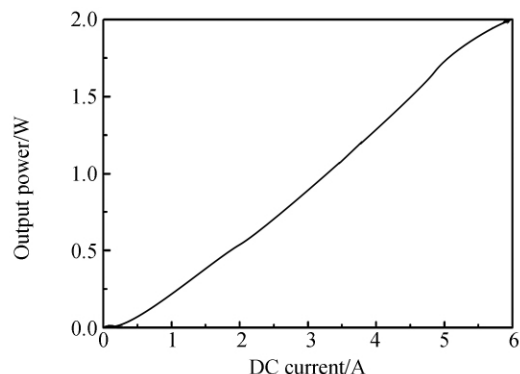


图 7 未经单元优化的 8×8 VCSEL 列阵的连续输出特性

Fig. 7 CW output characteristics of 8×8 VCSEL array without element device optimization

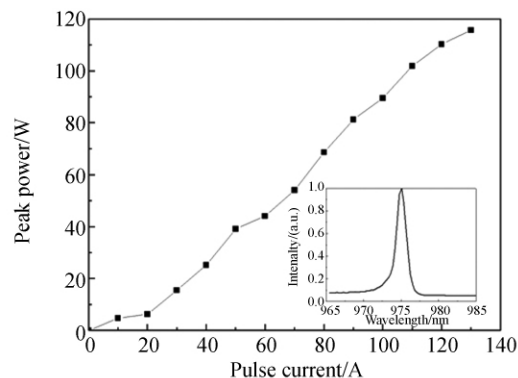


图 8 8×8 VCSEL 列阵的脉冲输出特性

Fig. 8 Pulse output characteristic of 8×8 VCSEL array

宽 100 ns。在驱动峰值电流为 130 A 时器件输出的峰值功率达到 115 W,光谱宽度为 2 nm,波长为 975 nm。从光脉冲波形测试结果可看出,光

脉冲的脉宽相对于电脉冲有所展宽,为 120 ns。在窄脉冲驱动条件下,VCSEL 列阵几乎不会受到热效应的影响,因此能够工作在较大驱动电流下。从光谱测试结果可以看出,VCSEL 列阵的波长未发生漂移,为 975 nm。

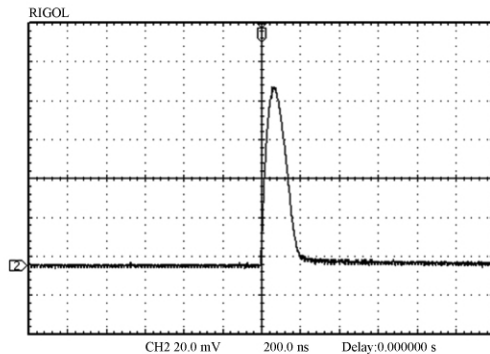


图 9 测试得到的光脉冲波形

Fig. 9 Measured light pulse waveform

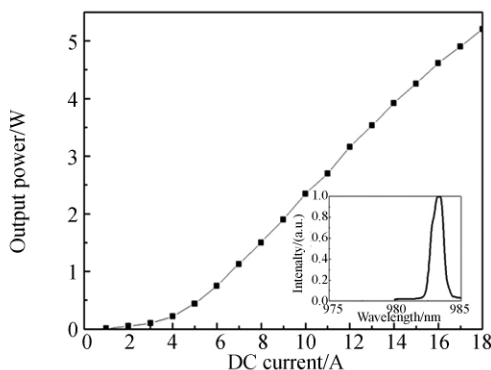


图 10 包含 300 个发光单元的 VCSEL 列阵测试曲线及输出光谱

Fig. 10 CW output characteristic of VCSEL array including 300 elements

参考文献:

- [1] KOYAMA F. VCSELs: their 30 years history and new challenges [J]. *SPIE*, 2008, 7135: 7135J (1-10).
- [2] KOYAMA F, MIYAMOTO T. Recent advances of VCSEL technologies [C]. *In IEEE 19th International Conference on Indium Phosphide & Related Materials*, 2007.
- [3] JI C, WANG J Y, SODERSTROM D, *et al.*. High volume 850nm oxide VCSEL development for high bandwidth optical data link applications [J]. *SPIE*, 2009, 7229: 722904(1-11).
- [4] MICHALZIK R, GRABHERR M, JAEGER R, *et al.*. Progress in high-power VCSELs and arrays [J]. *SPIE*, 1998, 3419: 187-195.
- [5] MILLER M, GRABHERR M, KING R, *et al.*. Improved output performance of high-power VCSELs [J]. *IEEE Journal on Selected Topics in Quantum Electronics*, 2001, 7(2): 210-216.
- [6] YAN C L, NING Y Q, QIN L, *et al.*. A high power InGaAs/GaAsP vertical-cavity surface-emit-

本文还研制出包含 300 个发光单元的 VCSEL 列阵。测试得到的曲线及光谱见图 10,在注入电流为 18 A 条件下器件输出功率达到 5.26 W,光谱半宽为 1.7 nm,输出波长为 983.5 nm。由于采用了主动制冷方式,有效降低了热效应的影响,使器件能够工作在更高的电流下,进而提高了连续输出功率。

4 结 论

通过分析 N-DBR 反射率与阈值电流,输出功率及转换效率的关系,对 N-DBR 反射率进行了优化以期得到最佳的器件输出特性。进行结构优化之后分别研制出具有 64 个及 300 个发光单元的 VCSEL 列阵,其中具有 64 个发光单元的列阵在注入电流为 6 A 时输出功率达到 2.73 W,光谱半宽为 0.7 nm,波长为 984 nm,远场发散角为 13.2° ,在重复频率为 100 Hz,脉宽为 100 ns 的脉冲电源驱动下,峰值输出功率达到 115 W;包含 300 个发光单元的列阵在注入电流为 18 A 时连续输出功率达到 5.26 W,光谱半宽为 2 nm。对理论计算及实验结果的分析表明,进一步改进 VCSEL 列阵的散热结构有助于进一步提高其输出功率,进而提高转换效率,同时热效应的消除能够有效抑制光谱的漂移。

- ting laser and its temperature characteristics [J]. *Semiconductor Science and Technology*, 2004, 17(19): 685-689.
- [7] HOFMANN W, GORBLICH M, ORTSIEFER M, *et al.*. Monolithic 2D high-power arrays of long-wavelength VCSELs [J]. *SPIE*, 2008, 6908: 690807.
- [8] SEURIN J F, GHOSH C L, KHALFIN V, *et al.*. High-power high-efficiency 2D VCSEL arrays [J]. *SPIE*, 2008, 6908: 690808.
- [9] SEURIN J F, GHOSH C L, KHALFIN V, *et al.*. High-power vertical-cavity surface-emitting arrays [J]. *SPIE*, 2008, 6876: 68760D.
- [10] SEURIN J F, XU G Y, KHALFIN V, *et al.*. Progress in high-power high-efficiency VCSEL arrays [J]. *SPIE*, 2009, 7229: 722903.
- [11] GESKE J, WANG C, MACDOUGAL M, *et al.*. High Power VCSELs for miniature optical sensors [J]. *SPIE*, 2010, 7615: 76150E.
- [12] SEURIN J F, XU G Y, WANG Q, *et al.*. High-brightness pump sources using 2D VCSEL arrays [J]. *SPIE*, 2010, 7615: 76150F.
- [13] ZHANG Y, NING Y Q, QIN L, *et al.*. High-power vertical-cavity surface-emitting laser with an optimized p-contact diameter [J]. *Applied Optics*, 2010, 49(19): 2793-2797.
- [14] 孙艳芳, 金珍花, 宁永强, 等. 高功率底发射 VCSELs 的制作与特性研究 [J]. *光学精密工程*, 2004, 12(5): 449-453.
- SUN Y F, JIN ZH H, NING Y Q, *et al.*. Fabrication and experimental characterization of high power bottom-emitting VCSELs [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2004, 12(5): 449-453. (in Chinese)
- [15] MACDOUGAL M, DAPKUS P, BOND A, *et al.*. Design and fabrication of VCSEL's with AlxOy-GaAs DBR's [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 1997, 3(3): 905-915.
- [16] SHERRIFF R, FELD S, LOEHR J. Comparison of exact and approximate optical designs of graded-interface distribute bragg reflectors [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 1999, 5(3): 582-589.
- [17] LI T, NING Y Q, HAO E J. Design and optimization of DBR in 980 nm bottom-emitting VCSEL [J]. *Science in China Series F: Information Sciences*, 2009, 52(7): 1266-1271.
- [18] GRABHERR M, MILLER M, JAGER R, *et al.*. High-power VCSEL's; single devices and densely packed 2-D-arrays [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 1999, 5(3): 495-502.
- [19] COLDREN L A, CORZINE S W. *Diode Lasers and Photonic Integrated Circuits* [M]. New York: Wiley 1995.

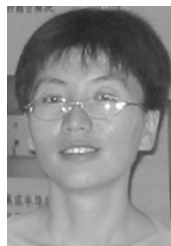
作者简介:



张星(1983—),男,吉林辉南人,博士,助理研究员,2011年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,研究方向为新型半导体光电子器件。E-mail: zhangx@ciomp.ac.cn



曾玉刚(1978—),男,四川泸州人,副研究员,2008年于中国科学院半导体研究所获得博士学位,研究方向为 III-V 族大功率半导体激光器和 MOCVD 材料生长。E-mail: zengyg@ciomp.ac.cn



秦莉(1969—),女,黑龙江鹤岗人,研究员,硕士生导师,1999年于吉林大学获得博士学位,主要从事大功率半导体激光器设计及应用的研究。E-mail: qinliciomp@yahoo.com.cn



刘云(1960—),女,吉林长春人,副研究员,硕士生导师,1983年于长春光机学院获得学士学位,主要从事大功率半导体激光器应用技术的研究。E-mail: hx5252@sohu.com