

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)

drive current of 130 A, a pulse width of 100 ns and a repetition frequency of 100 Hz. Furthermore, the VCSEL array including 300 elements can provide a CW output power of 5.26 W under the injected current of 18 A. It concludes that the performance of VCSEL array has been improved by N-DBR reflectivity optimization.

Key words: semiconductor laser; vertical-cavity surface-emitting laser; optimal design; distributed Bragg reflector

1 引言

垂直腔面发射激光器(Vertical-cavity Surface-emitting Laser, VCSEL)作为一种新型半导体激光器^[1],近年来受到了研究人员的广泛关注^[2],一些实用化的 VCSEL 已用于短距离光通信系统中^[3]。输出波长为 980 nm 的 VCSEL 能够作为固体激光器及光纤激光器泵浦源,也能用于泵浦光通信系统中的光纤放大器,因此有着广泛的应用前景^[4]。与常见的边发射激光器(EEL)相比,VCSEL 具有以下优点:能输出圆形对称光斑,因此其与光纤的耦合效率更高而光束整形的成本更低;制备工艺与集成电路制备工艺兼容,便于制成高密度二维列阵以实现更高功率输出;光学灾变损伤阈值远高于 EEL,更适合制成高输出功率器件。近年来,国内外的研究机构在研制高功率 VCSEL 方面取得了一系列重要进展^[5-14]。

为了满足泵浦应用的需求,VCSEL 要求输出功率很高,而提高 VCSEL 的输出功率主要有以下两种途径:一是提高 VCSEL 器件的有源区直径^[4];二是将多个 VCSEL 器件集成在一起制成 VCSEL 列阵^[7]。与大直径的单管器件相比,VCSEL 列阵能够在达到高输出功率的同时维持更高的转换效率^[8],具有更高的可靠性,因此二维集成是高功率 VCSEL 的主要发展方向。

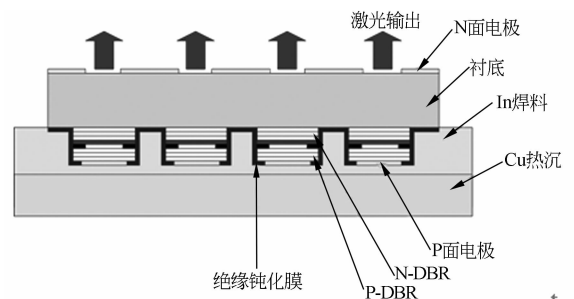
典型的 VCSEL 结构由两个多层分布布拉格反射镜(Distributed Bragg Reflector, DBR)及夹在其间的多量子阱有源区组成。当 VCSEL 的量子阱有源区结构相对确定之后,与器件输出特性最为相关的结构参数是有源区直径及 DBR 反射率。如果能够对 DBR 反射率和有源区直径进行优化,就能在器件的阈值电流,输出功率及转换效

率之间得到平衡,从而有效改善器件的输出特性。而当 VCSEL 列阵中的单元器件的性能得到优化之后,由多个单元器件组成的 VCSEL 列阵器件的整体性能也就随之得到了优化。前期的研究工作多数集中于对 DBR 结构本身的研究^[15-17]或单纯研究器件口径与 VCSEL 输出特性的关系^[4,18],而并未综合讨论器件口径、DBR 反射率及 VCSEL 列阵单元输出特性的依赖关系。本文根据相关理论模型计算了有源区直径不同的 VCSEL 列阵单元器件的 N 型 DBR (N-DBR) 反射率与其阈值电流,输出功率及转换效率之间的关系,并对 N-DBR 反射率进行调节以提高 VCSEL 列阵器件的整体性能,进行结构优化后研制出了同时具有较低阈值电流及较高输出功率的 VCSEL 列阵器件。

2 VCSEL 列阵单元结构优化

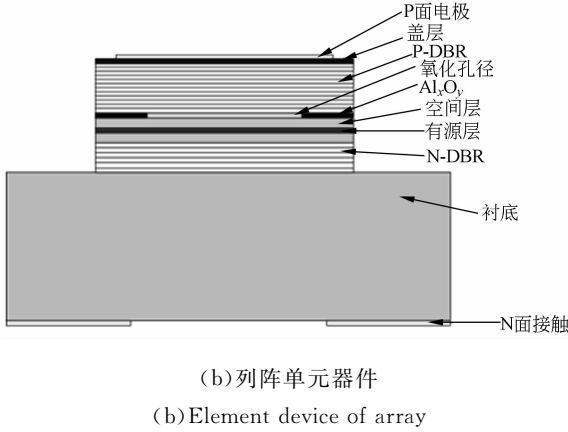
2.1 VCSEL 列阵及单元器件结构

由于利于散热及获得均匀的电流注入,980 nm 高功率 VCSEL 列阵多采用图 1(a)所示的底发射结构,即器件出光窗口制作在衬底面上。



(a) VCSEL 列阵

(a) VCSEL array



(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:

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

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{P_{out}}{I^2 R_s + IV_f} \quad (3)$$

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

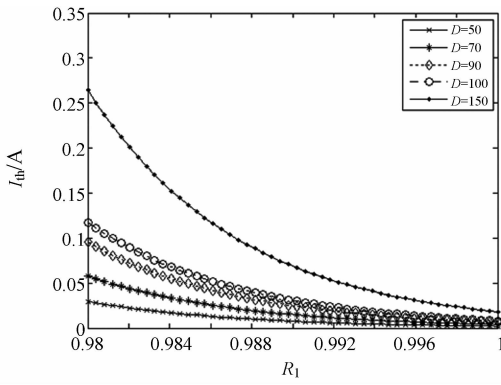
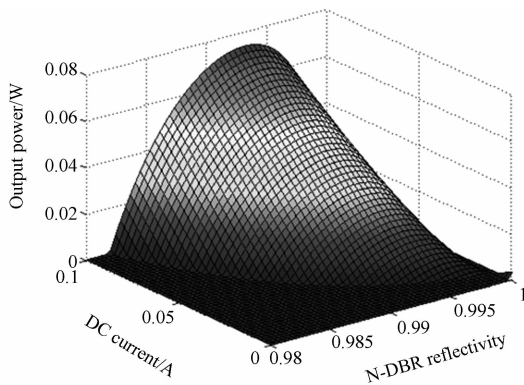


图 2 有源区直径不同的 VCSEL 列阵单元器件阈值电流与 N-DBR 反射率的关系

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

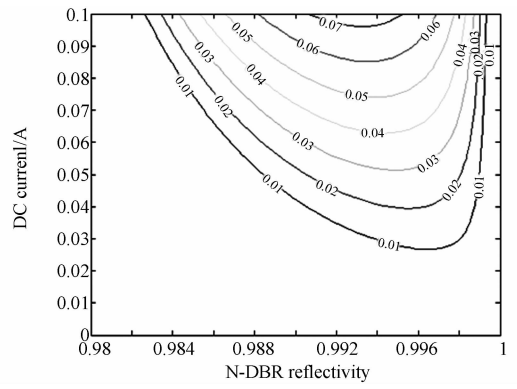
同。当 N-DBR 反射率为 99% 左右时,有源区直径为 100 μm 以下的单元器件阈值电流仍然在 0.03 A 以下,这样即使集成较多的器件组成列阵,阈值电流仍然会维持在较合理水平,因此,列阵器件的发光单元有源区直径最好在 100 μm 以下,从而使列阵器件整体阈值电流维持在较低水平。

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。



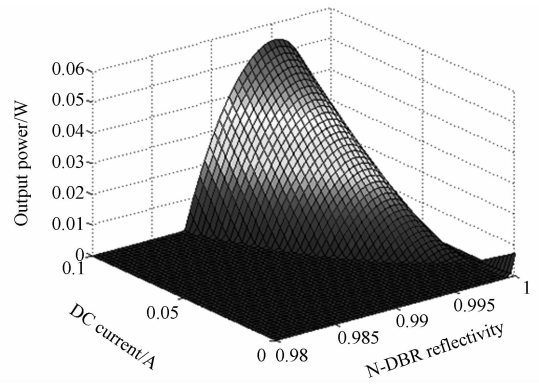
(a) 口径 100 μm 单元器件输出功率与 N-DBR 反射率及注入电流的关系

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



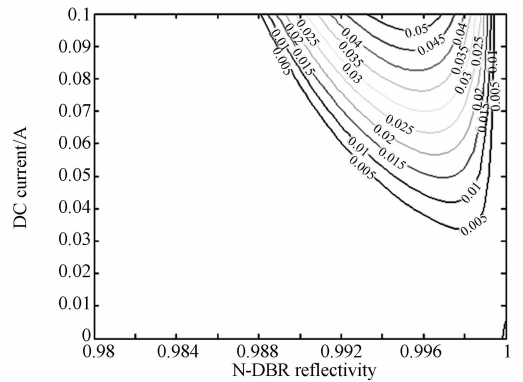
(b) 图(a)的平面等势图

(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



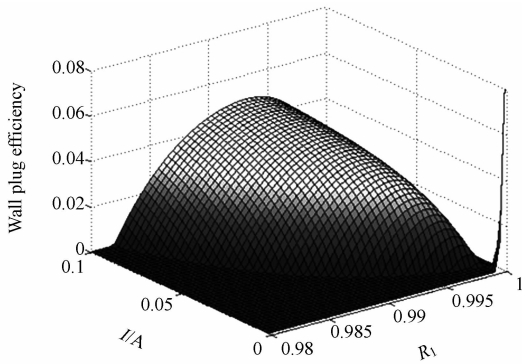
(d) 图(c)的平面等势图

(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

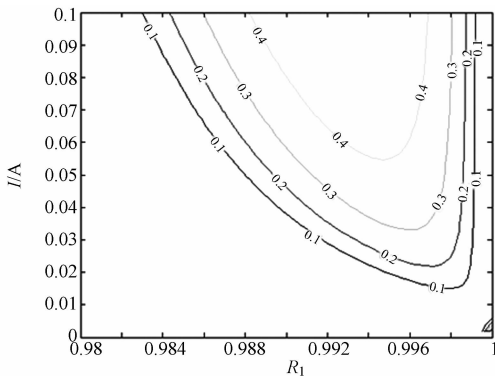
Fig. 3 Relationship between output characteristics and N-DBR reflectivities of VCSEL array elements with diameter-apertures of 100 μm and 150 μm

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。

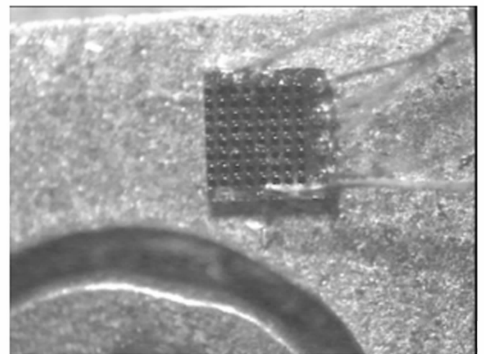
由图 4 可见,注入电流和 N-DBR 反射率都会对 VCSEL 的转换效率产生影响。与图 3 对比可以看出,在相同注入电流水平下,N-DBR 反射率对转换效率的影响与对输出功率的影响类似。

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

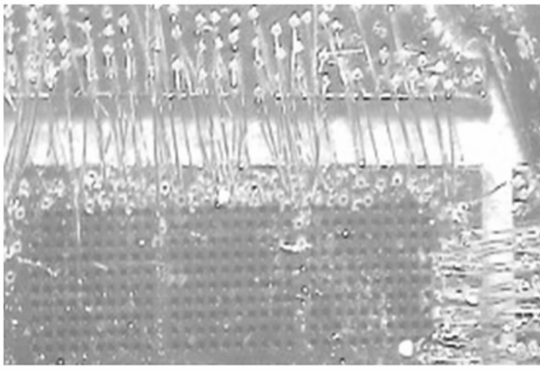
基于上述单元结构优化的结果,本文分别研制出具有 64 个发光单元的 8×8 VCSEL 列阵及具有 300 个发光单元的 10×30 VCSEL 列阵,列阵的发光单元直径均为 $100\ \mu\text{m}$,N-DBR 对数为 22 对,对应的中心反射率为 99.2% 。

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

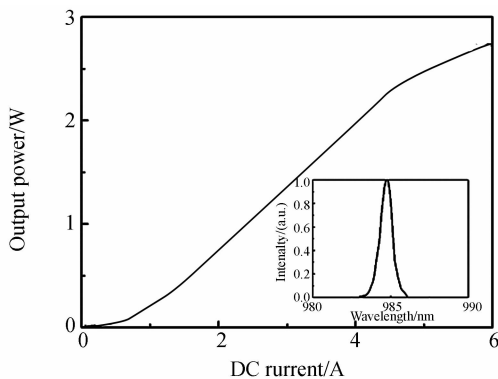


(b) 10×30 VCSEL 列阵
 (b) 10×30 VCSEL array
 图5 两种 VCSEL 列阵

Fig. 5 Two kinds of VCSEL arrays

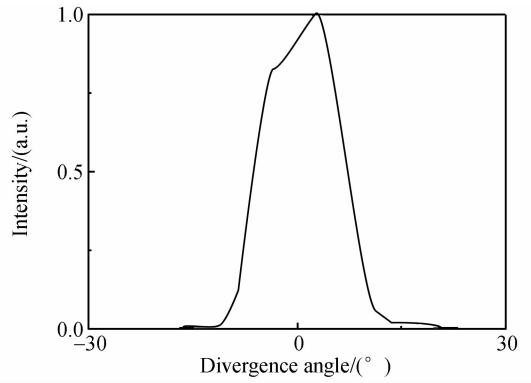
本文测试了具有 64 个发光单元的 8×8 VCSEL 列阵,测试结果分别示于图 6(a)及(b);同时未经单元结构优化,N-DBR 反射率为99.7%的器件测试结果示于图 7。由图 6 可见经过单元结构优化后的器件在连续注入电流为 6 A 时输出功率达到 2.73 W,阈值电流为 0.8 A,光谱半宽 0.7 nm,波长为 984 nm,远场发散角为13.2°,与图 7 中未经过优化的器件测试结果相比,阈值电流有所增加,但最高输出功率从 2 W 提高至 2.73 W,说明其斜率效率有了明显提高。同时从测试结果中可以看出,在连续工作时,采用被动制冷模式会使器件很大程度上受到热效应的影响,在注入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100Hz,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

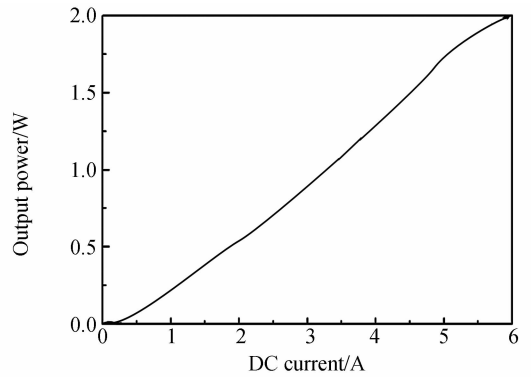


图7 未经单元优化的 8×8 VCSEL 列阵的连续输出特性

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

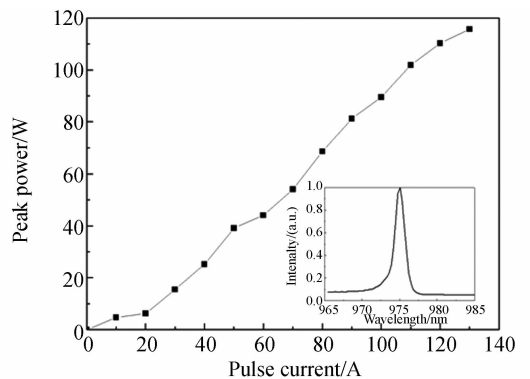


图8 8×8 VCSEL 列阵的脉冲输出特性

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。

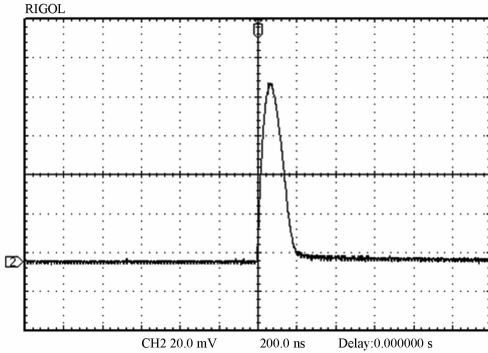


图 9 测试得到的光脉冲波形

Fig. 9 Measured light pulse waveform

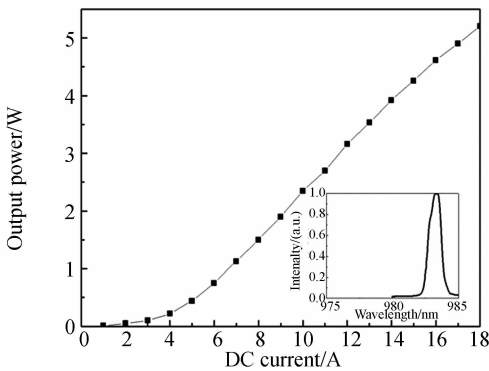


图 10 包含 300 个发光单元的 VCSEL 列阵测试曲线及输出光谱

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

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。

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-

- 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.

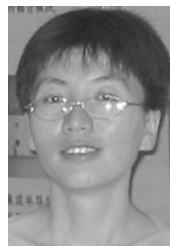
作者简介:



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



王立军(1946—),男,吉林舒兰人,研究员,博士生导师,主要从事大功率半导体激光器及应用的研究。E-mail: wanglj@ciomp.ac.cn

导师简介:



宁永强(1965—),男,吉林图们人,研究员,博士生导师,1999年于中科院长春物理所获得博士学位,研究方向为半导体物理及新型半导体激光器。E-mail: ningyq@ciomp.ac.cn

● 下期预告

3~5 μm 红外焦平面阵列的辐射定标

李 宁^{1,2}, 杨词银¹, 曹立华^{1,3}, 郭立红¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039; 3. 长春理工大学 理学院, 吉林 长春 130022)

为了在对目标进行跟踪观测的同时,得到目标的红外辐射特性,设计了一套红外焦平面阵列探测器的实验室辐射定标系统。以高精度的面源黑体为标准辐射源,对 3~5 μm 中波红外相机进行了响应度的标定。首先建立定标数学模型,确定定标流程;然后使用线性回归统计模型对响应度进行拟合和评估,并提出剔除局外点(outlier)方法对拟合曲线进行优化;最后在外场对温度和特性已知的目标进行测量,通过实验室得到的响应度曲线和大气透过率参数进行红外辐射特性数据的反演,得到实际测量值,其与理论值的相对误差小于 3%。结果表明,该优化方法能有效改善红外焦平面阵列响应度非线性引起的反演不确定度。