

高功率窄脉冲垂直腔面发射激光器 n-DBR 反射率的优化

张立森^{1,2} 宁永强¹ 张 星¹ 刘 迪^{1,2} 秦 莉¹ 张金龙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 从理论上研究了 n 型分布布拉格反射镜(n-DBR)的反射率对器件阈值电流、输出功率以及转换效率的影响, 得出了最佳反射率。在此基础上研制了垂直腔面反射激光器(VCSEL)单管和阵列器件, 采用波形分析法对 VCSEL 器件的功率进行了测试。在脉冲宽度 60 ns, 重复频率 100 Hz 条件下, 500 μm 口径单管器件在注入电流为 110 A 时, 峰值输出功率达 102 W, 功率密度为 52 kW/cm^2 , 4×4 、 5×5 阵列器件在 100 A 时, 功率分别达到 98 W 和 103 W。对比了单管器件在连续、准连续和脉冲工作条件下的输出特性和光谱特性, 连续和准连续条件下激射波长的红移速率分别为 0.92 nm/A 和 0.3 nm/A, 6 A 时的内部温升分别为 85 $^\circ\text{C}$ 和 18 $^\circ\text{C}$, 而脉冲条件下激射波长的红移速率仅为 0.0167 nm/A, 6 A 时的温升为 1.5 $^\circ\text{C}$, 远小于连续和准连续的情况, 这也是器件在脉冲条件下能得到很高输出功率的主要原因。

关键词 激光器; 垂直腔面发射激光器; 窄脉冲; 高功率; 自热效应

中图分类号 TN248.4 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201239.0502003

Optimization of n-DBR in High Power Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser under a Short Pulsed Operation

Zhang Lisen^{1,2} Ning Yongqiang¹ Zhang Xing¹ Liu Di^{1,2} Qin Li¹

Zhang Jinlong¹ Liu Yun¹ Wang Lijun¹

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

Abstract The dependent of threshold current, output power and wall-plug efficiency on the reflectivity of n-distributed Bragg reflector (DBR) is simulated theoretically. The vertical-cavity surface-emitting laser (VCSEL) single device and arrays are fabricated and tested using waveform analysis method. The pulse width and repetition rate are 60 ns and 100 Hz, respectively. The peak output power of single device with an aperture of 500 μm is up to 102 W, corresponding to a power density of 52 kW/cm^2 , when the injection current is 110 A. The peak powers of 4×4 and 5×5 arrays are 98 W and 103 W at 100 A. The output power and the spectra of single device are compared at different injection currents under continuous wave (CW), quasi-CW (QCW), and pulsed operation, respectively. It is also concluded that the red shift rate of lasing wavelength is 0.92 nm/A and 0.3 nm/A, the temperature rise is 85 $^\circ\text{C}$ and 180 $^\circ\text{C}$ under CW and QCW operation, respectively. While it is only 0.0167 nm/A under pulsed operation, the corresponding temperature rise at 6 A is 1.5 $^\circ\text{C}$, which is far less than that under the other two conditions. That is why the peak power is so high under pulsed operation.

Key words lasers; vertical cavity surface emitting laser; short pulse; high power; self-heating effect

OCIS codes 140.3538; 120.6810; 140.7260; 220.4840

收稿日期: 2011-12-13; 收到修改稿日期: 2012-02-07

基金项目: 国家自然科学基金(10974012, 60876036, 90923037, 11074247, 61006054, 61106047, 61176045, 51172225 和 61106068)资助课题。

作者简介: 张立森(1985—), 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: zhsls1209@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)

1 引言

窄脉冲激光器因其具有工作脉冲宽度窄、峰值功率高等优点,在医疗、工业、军事等方面具有广泛的应用^[1~5]。例如激光打孔、激光焊接、激光测距、激光雷达等。与固体激光器不同,半导体激光器具有体积小、重量轻、转换效率高优点,并且它的制造工艺与半导体电子器件和集成电路的生产工艺兼容,便于与其他器件实现单片光电子集成。而传统的边发射激光器相比,垂直腔面发射激光器(VCSEL)还具有以下优势^[6~10]:光束质量好、光斑呈圆形对称分布、发散角小、易于与光纤耦合;易实现低阈值电流;单纵模工作、波长稳定性好;可制作高密度二维面阵等。因此高功率窄脉冲垂直腔面发射激光器有着非常广阔的应用前景。

对于半导体激光器来说,在连续工作条件下,受其转换效率的限制,激光器内部势必会产生大量的热,使得有源区的增益下降,功率发生饱和。为了使激光器长时间在高功率状态下工作,必须进行有效的散热,设计复杂的冷却装置,这就增加了工艺难度,也提高了成本。且对于某些应用来说,并不需要激光器的连续工作,只需要在极短的时间内产生很高的功率即可。这就催生了对窄脉冲半导体激光器的研究。研究表明^[11]在脉冲宽度为 500 ns 以下,占空比 1% 的情况下,激光器的热效应可以忽略不计,这样就不需要专门的散热装置,从而简化了工艺,降低了制作成本,并且电流可以加得很大,从而获得高的峰值功率。而由于 VCSEL 不受光学灾变的影响,在窄脉冲高功率方面具有很好的发展前景。2001 年,Michael Miller 等^[12]制作的 VCSEL 单管器件输出功率为 0.89 W,阵列器件达到 1.55 W。2005 年,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所制作的 VCSEL 单管器件的连续输出功率达到了 1.95 W^[13],而普林斯顿公司将这一纪录提高到了 3 W^[14]。这是迄今为止,单管器件在连续工作条件下所得到的最大功率。为了进一步提高功率,人们制作了 VCSEL 阵列器件,Princeton Optronics 公司利用 5 mm×5 mm 的阵列芯片在 320 A 连续电流下得到 230 W 的输出功率,脉冲输出功率达到 2.2 kW^[15]。2001 年,德国的 Ulm 大学制作的 VCSEL 单管器件在脉冲条件下,峰值功率达到了 10 W^[12],2008 年,日本的 Nobuyuki Otake 等^[16]将功率提高到 12.5 W,2011 年中国科学院长春光学精密机械与物理研究所制作的单管器件取得突破性进展,峰值功率达到 92 W^[17],为单管器件在脉冲条

件下所见报道的最大值。

本文从理论上研究了 n 型分布布拉格反射镜(n-DBR)的反射率对器件阈值电流、输出功率以及转换效率的影响,对器件的 n-DBR 反射率进行了优化。采用波形分析法对 980 nm VCSEL 单管和阵列器件的脉冲工作特性进行了测试研究,脉冲宽度为 60 ns,频率为 100 Hz。单管峰值功率达到了 102 W,阵列峰值功率达到 103 W。并且在连续、准连续情况下对单管器件的功率和光谱进行了测试,与脉冲情况进行了对比,在理论和实验上对其特性进行了分析和解释。

2 980 nm VCSEL 器件的 n-DBR 对数优化

2.1 VCSEL 单管器件的结构

980 nm 垂直腔面发射激光器的结构如图 1 所示。VCSEL 的外延片是通过金属氧化物化学气相沉积(MOCVD)的方法生长而成。主要包括 3 个部分,p-DBR,n-DBR 和有源区。有源区夹在 p-DBR 和 n-DBR 之间,由 3 个 $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ /GaAsP 量子阱(QW)组成,其中 $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ 阱层厚 6 nm,GaAsP 垒层的厚度为 8 nm。有源区与空间层形成 1λ 谐振腔。p-DBR 由 30 对 C 掺杂的 $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$ /GaAs 组成,掺杂浓度为 $2.5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$,反射率可达 99.9% 以上。在 p-DBR 与空间层之间有一层 30 nm 厚的 $\text{Al}_{0.98}\text{Ga}_{0.02}\text{As}$,该层在进行选择性氧化工艺后,可以形成一层低折射率且绝缘的 Al_2O_3 ,既起到对有源区电流的限制作用,又可以等效为一凸透镜,产生一定的光限制。n-DBR 一般由 18~28 对 Si 掺杂的 $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$ /GaAs 组成,掺杂浓度为 $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 。

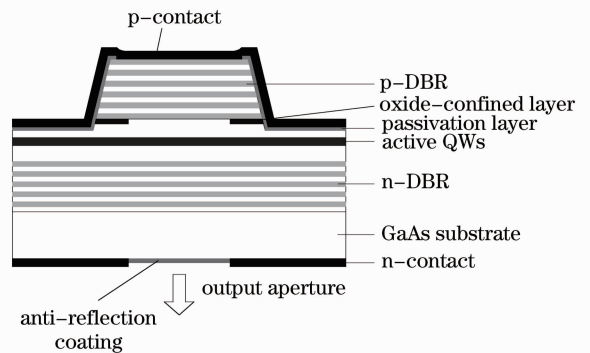


图 1 底发射的垂直腔面发射激光器结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of bottom-emitting VCSEL device

2.2 理论模型

要想得到好的器件性能,应该选择最佳的 n-

DBR 的对数,为此从阈值电流密度、外量子效率和输出功率的角度分析了不同 n-DBR 对数对器件的影响。

VCSEL 器件的阈值电流密度可以表示为

$$J_{th} = qdB_{eff}N_{tr}^2/\eta_i \exp\left[\frac{2}{a_N\Gamma}\left(\alpha_{in} + \frac{1}{L_{eff}} \ln \frac{1}{\sqrt{R_t R_b}}\right)\right], \quad (1)$$

式中 q 为电子电荷量, d 为多个量子阱的总厚度, B_{eff} 为有效复合系数, N_{tr} 为透明载流子浓度, η_i 为内量子效率, a_N 为增益系数, Γ 为限制因子, α_{in} 为内部损耗, L_{eff} 为有效腔长, R_t 和 R_b 分别为 p-DBR 和 n-DBR 的反射率。

器件的外量子效率和输出功率表达式为

$$\eta_d = \eta_i \frac{\ln(1/\sqrt{R_t R_b})}{\alpha_{in} L_{eff} + \ln(1/\sqrt{R_t R_b})}, \quad (2)$$

$$P_o = \eta_d \frac{h\nu}{q} (I - \pi r^2 J_{th}), \quad (3)$$

$$P = P_o \left(1 - \frac{\Delta T}{T_{off}}\right), \quad (4)$$

式中

$$\Delta T = R_T [(V_o + IR_d)I - P],$$

ΔT 为由于器件的自热效应所导致的内部温升, $R_T = (4\lambda_c r)^{-1}$ 为热阻, λ_c 为平均热导率, r 为器件半径, V_o 为开启电压, R_d 为串联电阻, P_o 和 P 分别为不考虑和考虑自热效应时器件的输出功率, h 为普朗克常量, ν 为光子频率, I 为注入电流, T_{off} 为截止温度。

器件的转换效率定义为输出的光功率与输入的电功率的比值,而电功率可以由电压与电流的乘积进行表示:

$$P_e = (V_o + IR_d)I, \quad (5)$$

从而得到转换效率 $\eta = P/P_e$ 。

2.3 计算结果和分析

根据理论模型,对器件的性能进行了模拟计算,所需参数列于表 1。

表 1 材料和结构参数

Table 1 Material and structural parameters

Parameter	Symbol	Value
Effective recombination constant	$B_{eff}/(\text{cm}^3/\text{s})$	1.5
Internal quantum efficiency	$\eta_i/\%$	100
Effective cavity length	L_{eff}/nm	1010
Total internal loss	$\alpha_{in}/\text{cm}^{-1}$	10
Turn-on voltage	V_o/V	1.5
Series resistance	R_d/Ω	0.05
Cut-off temperature	T_{off}/C	170

图 2 显示了阈值电流密度和外量子效率与 n-DBR 反射率的关系。从图中可以直观地看出,两个参数都随着 n-DBR 反射率的增加而降低,当 n-DBR 的反射率大于 99% 时,器件的阈值电流密度小于 1 kA/cm²,反射率大于 99.5% 时,外量子效率开始急速下降。为了得到高的输出功率,需要提高外量子效率,这就要求降低 n-DBR 的反射率,从而导致阈值电流密度的增加。所以好的器件性能不能通过单纯地降低或提高 n-DBR 的反射率得到,要从多个方面综合考虑,既要维持较低的阈值电流又要得到高的输出功率。

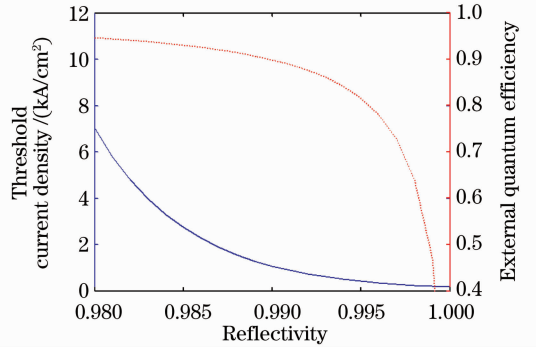


图 2 阈值电流和外量子效率与 n-DBR 反射率的关系
Fig. 2 Dependence of threshold current density and external quantum efficiency on the reflectivity of n-DBR

图 3 为考虑和考虑不自热效应时输出功率与注入电流及 n-DBR 反射率的关系。从图中可以看出, n-DBR 的反射率越高,越容易激射,说明器件的阈值电流越小。图 3(b) 中轮廓线上的数值代表功率的大小,轮廓线的疏密程度表示器件功率变化的快慢程度,可以看出,当 n-DBR 的反射率在 99.0% ~ 99.4% 之间时,器件可以达到比较高的输出功率。随着注入电流的增加,器件的功率先是缓慢增加,达到最大值后迅速下降,这主要是由于器件的自热效应导致内部温度升高,从而使得器件的性能变差。在图 3(c) 和 (d) 中,器件的输出功率随着电流的增加而不断上升,斜率效率比考虑自热效应时大得多,这种情况可以通过良好的散热或者窄脉冲驱动来近似实现。

图 4 为考虑和考虑不自热效应时器件的转换效率与注入电流及 n-DBR 反射率的关系。可以看出,当 n-DBR 的反射率在 99.2% ~ 99.6% 之间时,器件具有较高的转换效率。通过与图 3 对比发现,转换效率和输出功率的最大值并不在同一位置,转换效率的最大值位于较小的注入电流处,当注入电流进一步增加时,转换效率缓慢下降,不考虑自热效应

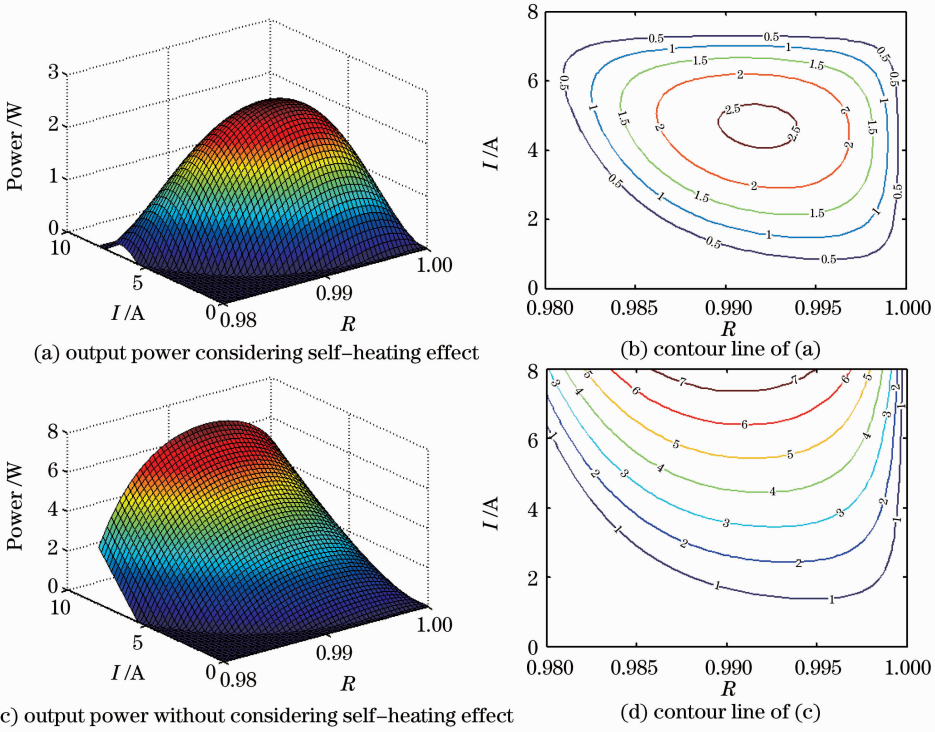


图 3 考虑和不考虑自热效应时器件的输出功率与注入电流及 n-DBR 反射率的关系
 Fig. 3 Dependence of output power on n-DBR reflectivity at different injection currents with and without considering self-heating effect

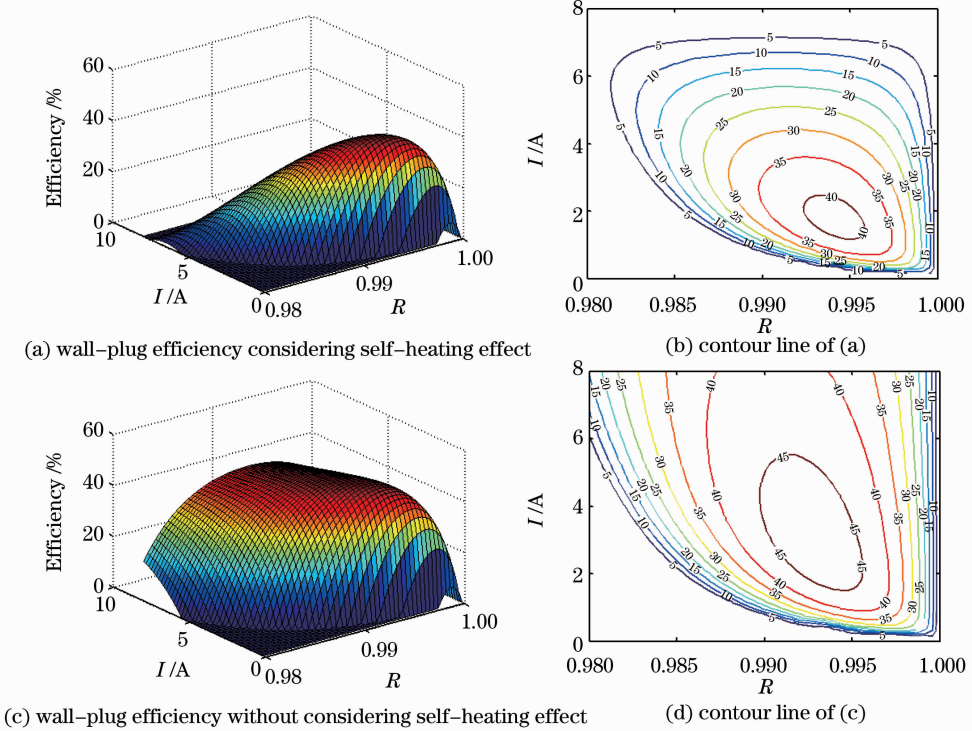


图 4 考虑和不考虑自热效应时器件的转换效率与注入电流及 n-DBR 反射率的关系
 Fig. 4 Dependence of wall-plug efficiency on n-DBR reflectivity at different injection currents with and without considering self-heating effect

时这种现象更加明显。

从以上的计算和分析中可以得到两条结论:1)

为了得到较高的输出功率和转换效率同时维持较低的阈值电流,应该选择 n-DBR 的反射率为 99.3%;

2) 器件的自热效应对输出功率和转换效率的影响非常大,为了获得更好的输出特性,可以提高器件的散热性能或者采用窄脉冲驱动的方式降低自热效应,后者更为有效。

3 器件的研制

器件的制作主要通过以下步骤实现:首先在 p 面进行光刻,利用化学腐蚀的方法刻蚀台面,使得 $\text{Al}_{0.98}\text{Ga}_{0.02}\text{As}$ 裸露出来,并进行选择性氧化工艺以形成电流注入孔径,氧化深度为 $20\sim 30\ \mu\text{m}$ 。然后生长一层 SiO_2 绝缘层,对其进行光刻以露出台面上的 GaAs 层,利用电子束蒸发的方法在上面沉积 p 面电极(Ti/Pt/Au)。为了减小 n 面的吸收损耗,将衬底的厚度减薄抛光至 $150\ \mu\text{m}$ 厚度左右。然后采用双面相对准工艺在 n 面制作出光窗口,并在出光窗口上沉积一层 HfO_2 增透膜(AR coating),以提高输出功率。n 面的欧姆接触是采用剥离(lift-off)工艺蒸发 AuGeNi/Au 制作的环形电极。为了利于散热,采用 n 面出光,利用倒装的方式将芯片装配在热沉上。

4 测试方法与原理

对于纳秒级的窄脉冲激光功率测试,常用的方法有 3 种^[18,19]:波形分析法、峰值保持法和等效采样法,其中波形分析法又可分为半宽度法、面积法和波形积分法。本实验采用的是半宽度法,脉冲波形为对称分布或高斯分布时,常用此方法。测试原理如图 5 所示。对于这种分布的脉冲波形,a、b、c、d 4 个区域的面积有以下关系

$$S_a + S_d = S_b + S_c, \quad (6)$$

所以整个波形的面积等于等效矩形的面积

$$S = tV_p, \quad (7)$$

式中 S 为脉冲波形的面积, t 为脉冲半峰全宽

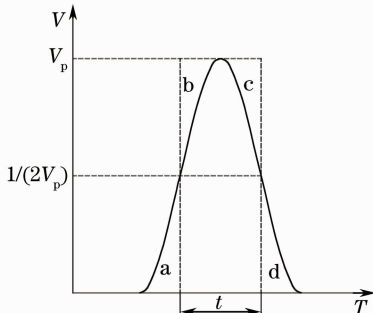


图 5 半峰全宽法脉冲峰值功率测试原理图

Fig. 5 Principle of FWHM measuring peak power

(FWHM), V_p 为峰值电压。

光电探测器的瞬时电压 $V(t)$ 与光的瞬时功率 $P(t)$ 存在关系

$$V(t) = CP(t), \quad (8)$$

$$V_p = CP_p, \quad (9)$$

式中 C 为常数, P_p 为峰值功率。

对(8)式进行积分得

$$S = \int V(t) dt = \int CP(t) dt = CQ, \quad (10)$$

式中 Q 为单个脉冲的能量。由(7)、(9)式、(10)式可得

$$P_p = Q/t. \quad (11)$$

由(11)式可知,若要得到脉冲激光的峰值功率只需测出单个脉冲的能量以及脉冲波形的半峰全宽即可。

5 测试结果与分析

首先对器件的 n-DBR 反射率进行了测试,并给出了反射谱,如图 6 所示。测试数据显示,器件在 $980\ \text{nm}$ 附近的反射率约为 99.3% ,与设计结果相符。

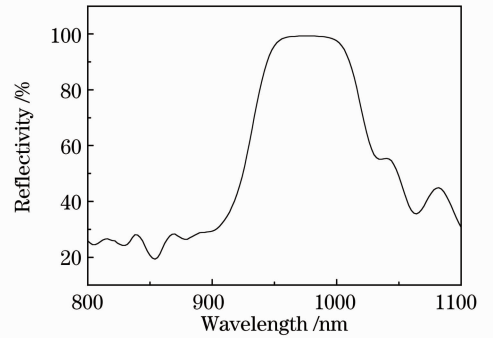


图 6 n-DBR 的反射谱

Fig. 6 Reflectivity of n-DBR

研制了 $500\ \mu\text{m}$ 口径的单管器件和不同尺寸的阵列器件,并对其功率特性在脉冲条件下进行了测试,与优化前器件的结果进行了对比。脉冲宽度为 $60\ \text{ns}$,重复频率为 $100\ \text{Hz}$ 。如图 7 所示,(a)为 $500\ \mu\text{m}$ 口径单管器件,(b)为 5×5 阵列器件,单元口径为 $100\ \mu\text{m}$,(c)为 4×4 阵列器件,单元口径为 $140\ \mu\text{m}$,(d)为优化前单管器件的输出功率。由于受到电源的限制, $500\ \mu\text{m}$ 口径单管器件在注入电流为 $110\ \text{A}$ 时,输出功率达到 $102\ \text{W}$,功率密度达到约 $52\ \text{kW}/\text{cm}^2$, 5×5 阵列和 4×4 阵列在 $100\ \text{A}$ 时,输出功率分别达到 $98\ \text{W}$ 和 $103\ \text{W}$, $500\ \mu\text{m}$ 口径单管器件和 5×5 阵列器件的发光面积相等,而阵列器件的输出功率要高于大直径单管器件。这主要是因为单管

口径较大,电流注入不均匀,而对于阵列器件,每个单元的口口径较小,使得电流注入更加均匀。而优化前的

单管器件的输出功率远小于优化后的器件,90 A 时仅有 27 W 的输出功率,功率密度不到 14 kW/cm²。

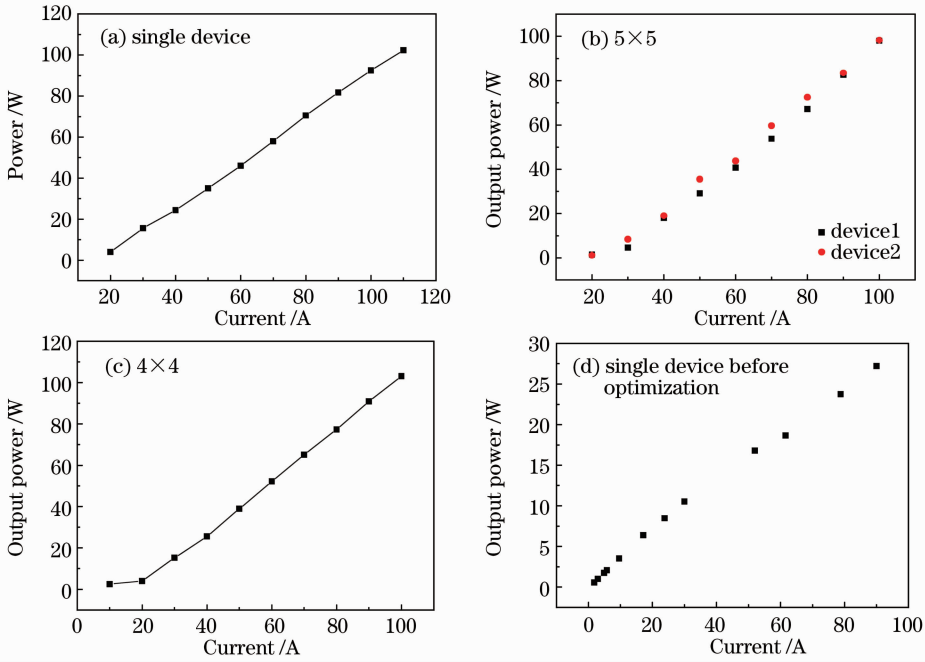


图 7 各种 VCSEL 器件的 $P-I$ 特性

Fig. 7 $P-I$ characteristics of different VCSEL devices

在室温下采用连续 (CW)、准连续 (QCW) 和脉冲 3 种方式对 500 μm 口径的单管器件的功率和光谱性能进行了测试和对比。图 8 为室温下器件在连续和准连续工作时的功率输出特性曲线。连续工作下,器件的阈值电流和微分电阻分别为 0.78 A 和 0.06 Ω ,器件的输出功率在 6 A 时达到 2.22 W,由于自热效应的影响开始出现饱和;准连续工作的参数为脉宽 50 μs ,频率 100 Hz,器件的阈值电流和微分电阻分别为 0.8 A 和 0.11 Ω ,受到电源条件的限制,注

入电流为 6 A 时,输出功率达到 2.66 W。

图 9 中(a)、(b)和(c)分别为连续、准连续和脉冲工作时不同注入电流的光谱图,器件的光谱半宽约为 1.1 nm。通过对比峰值波长的红移速度,可以看出器件在连续工作时的热效应比准连续和脉冲工作情况大得多。当连续工作电流从 2.5 A 增加到 6.0 A 时,激射波长从 977.23 nm 漂移到 980.44 nm,红移速率约为 0.92 nm/A。VCSEL 器件的波长随温度的漂移速率典型值为 0.065 nm/K,温升速率约为 14 $^{\circ}\text{C}/\text{A}$,当连续电流达到 6 A 时,器件的内部温升高达约 85 $^{\circ}\text{C}$ 。而在准连续工作时,红移速率只有约 0.3 nm/A,温升约为 18 $^{\circ}\text{C}$ 。从图 9(c)可知,在脉冲工作情况下,当注入电流从 10 A 增加到 80 A 时,器件的峰值波长基本没有变化,红移速率仅有 0.0167 nm/A,6 A 时的内部温升仅为 1.5 $^{\circ}\text{C}$,远低于连续工作和准连续工作的情况,即使是在电流高达 100 A 的情况下,器件的内部温升也仅有 25.7 $^{\circ}\text{C}$ 。

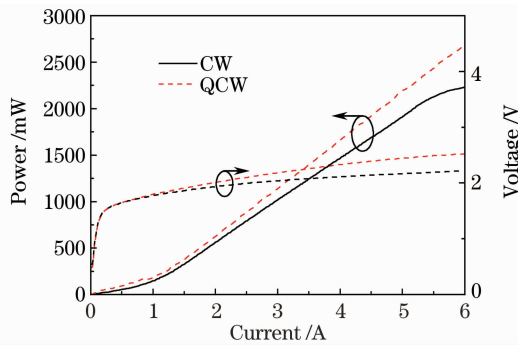


图 8 连续和准连续情况下 500 μm 单管器件的输出特性曲线

Fig. 8 Output power characteristics of a single device with an aperture of 500 μm under CW and QCW operation

从(4)式和上面的分析可以看出,对于特定的器件,影响其功率的因素主要是内部温升 ΔT ,为了得到更高的输出功率,一方面除了将器件所产生的热及时导出,另一方面应设法降低器件本身所产生的热量。使器件在脉冲条件下工作可以显著地降低所产生的热量,从而极大地提高器件的输出功率。

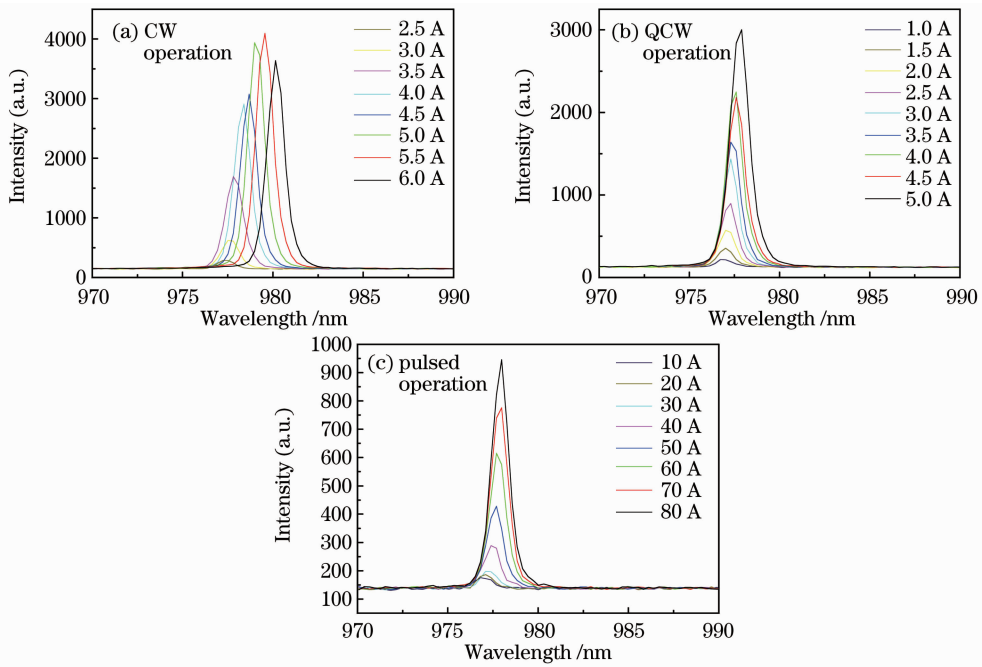


图9 不同注入电流下的激光光谱图

Fig. 9 Wavelength spectra at different injection currents

6 结 论

通过理论模拟,综合考虑器件的阈值电流、输出功率以及转换效率等方面,得到了最佳的 n-DBR 反射率,优化了谐振腔出光面的反射率。研制了 VCSEL 单管和阵列器件,对 VCSEL 器件的输出功率及激光光谱进行了测试。500 μm 直径单管器件在注入电流为 110 A 时,峰值功率达到 102 W,功率密度为 52 kW/cm^2 ,与优化前相比有了极大的提高,4×4、5×5 阵列器件在 100 A 时,功率分别达到 98 W 和 103 W。对比了 500 μm 单管器件在连续、准连续和脉冲工作条件下的 $P-I$ 特性和光谱特性,在连续工作时,随着电流的增加,器件的自热效应导致内部温度升高,使得输出功率很快饱和。而且器件的激光波长发生明显红移,漂移速率达到 0.92 nm/A,而在准连续条件下,漂移速率为 0.3 nm/A,脉冲条件下仅为 0.0167 nm/A,远小于连续和准连续的情况。

参 考 文 献

- Jia Baohui, Liu Chao, Fu Li *et al.*. Effect of the combined use of transmyocardial laser revascularization and implantation of endothelial progenitor cells on canine ischemic heart[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(6): 1654~1658
贾宝辉,刘超,付莉等.激光心肌血运重建联合血管内皮祖细胞移植治疗缺血性心脏病[J]. *中国激光*, 2010, **37**(6): 1654~1658
- Wang Xiaodong, Wang Shenglie, Liu Jinsong. Effect of quasi-vacuum environment in ablation with high repetition rate pulsed laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(1): 238~243

- 王晓东,汪盛烈,刘劲松.高重复频率脉冲激光材料烧蚀的真空环境效应[J]. *中国激光*, 2009, **36**(1): 238~243
- Sven Döring, Sören Richter, Stefan Nolte *et al.*. In situ imaging of hole shape evolution in ultrashort pulse laser drilling[J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(19): 20395~20400
- Zhao Dalong, Chen Qiansong, Qin Laigui *et al.*. Study on walk error in pulsed laser range-finding[J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(9): 1112~1116
赵大龙,陈千颂,秦来贵等.脉冲激光测距漂移误差的研究[J]. *中国激光*, 2004, **31**(9): 1112~1116
- Yuan Liu, Jiqiao Liu, Weibiao Chen. Eye-safe, single-frequency pulsed all-fiber laser for Doppler wind lidar[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2011, **9**(9): 090604
- Cui Jinjiang, Ning Yongqiang, Jiang Chenyu *et al.*. Beam quality of high power vertical-cavity bottom-emitting semiconductor lasers[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(1): 0102002
崔锦江,宁永强,姜琛昱等.大功率垂直腔底发射半导体激光器的光束质量[J]. *中国激光*, 2011, **38**(1): 0102002
- Wang Zhengfu, Ning Yongqiang, Zhang Yan *et al.*. High power and good beam quality of two-dimensional VCSEL array with integrated GaAs microlens array[J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(23): 23900~23905
- 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,王烨等.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
- Yan Zhang, Yongqiang Ning, Li Qin *et al.*. High-power vertical-cavity surface-emitting laser with an optimized p-contact diameter[J]. *Appl. Opt.*, 2010, **49**(19): 3793~3797
- Wang Zhenfu, Ning Yongqiang, Li Te *et al.*. High-power large-aperture bottom-emitting 980-nm VCSELs with integrated GaAs microlens[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2009, **21**(4): 239~241
- M. Brunner, K. Gulden, R. Hovel *et al.*. Thermal lensing effects in small oxide confined vertical-cavity surface-emitting

- lasers[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2000, **76**(1): 7~9
- 12 Michael Miller, Martin Grabherr, Roger King *et al.*. Improved output performance of high-power VCSELs[J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2001, **7**(2): 210~216
- 13 Li Te, Ning Yongqiang, Sun Yanfang *et al.*. High-power InGaAs VCSEL's single devices and 2-D arrays[J]. *Journal of Luminescence*, 2007, **122**(123): 571~573
- 14 L. Arthur, D'Asaro, Jean-Francois Seurin *et al.*. High-power, high-efficiency VCSELs pursue the goal[J]. *Photonics Spectra*, 2005, **39**(2): 64
- 15 Jean-Francois Seurin, Chuni L. Ghosh, Viktor Khalfin *et al.*. High-power vertical-cavity surface-emitting arrays[C]. *SPIE*, 2008, **6876**: 68760D
- 16 Nobuyuki Otake, Katsunori Abe, Hitoshi Yamada *et al.*. High-power vertical-cavity surface-emitting laser under a short pulsed operation[J]. *Appl. Phys. Express*, 2009, **2**(5): 052102
- 17 Lisen Zhang, Yongqiang Ning, Yugang Zeng *et al.*. High-power bottom-emitting vertical-cavity surface-emitting lasers under continuous-wave, quasi-continuous-wave, and pulsed operation [J]. *Appl. Phys. Express*, 2011, **4**(5): 052102
- 18 Zhang Guijun, Zhang Ruiyi, Feng Kaifei. Study on the methods of measurement and calibration of the peak power of the narrow pulsed semiconductor laser[J]. *Laser Journal*, 2009, **30**(1): 26~27
- 张贵军, 张锐一, 冯凯飞. 窄脉冲半导体激光器峰值功率测试及校准方法研究[J]. *激光杂志*, 2009, **30**(1): 26~27
- 19 Zhu Min, Lu Yaodong, Man Chunyang *et al.*. Peak power measurement of high power and high speed diode laser[J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2006, **17**(11): 1343~1345
- 祝敏, 陆耀东, 满春阳等. 大功率高速半导体激光峰值功率测试技术研究[J]. *光电子•激光*, 2006, **17**(11): 1343~1345

栏目编辑:宋梅梅