

大功率短脉冲 VCSELs 的特性研究

彭航宇^{1,2}, 宁宇^{1,2}, 刘云¹, 张岩^{1,2}, 宁永强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 100039)

摘要: 研究了大功率短脉冲垂直腔表面发射激光器(VCSELs)出光孔径分别为 400 μm , 600 μm 的 980nm 倒封装底发射 VCSELs 的脉冲特性, 通过测试脉冲电流源产生的电脉冲的波形曲线以及产生的光脉冲的脉冲响应曲线, 得到脉冲峰值功率与输入电流的 $P-I$ 曲线, 600 μm 直径的 VCSELs 在脉冲宽度为 60ns, 重复频率为 1kHz 时, 得到超过 20W 的峰值输出功率; 激光波长为 976.6nm, 器件的光谱半高宽(FWHM)为 0.9nm。

关键词: 垂直腔面发射激光器; 短脉冲; 峰值功率

中图分类号: TN248.4 **文献标识码:** A

Experimental Characterization of High Power Short Pulsed VCSELs

PENG Hang-yu^{1,2}, NING Yu^{1,2}, LIU Yun¹, ZHANG Yan^{1,2}, NING Yong-qiang¹, WANG Li-jun¹

(1. Lab. of Excited States Processes, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China; 2. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: High power VCSEL (Vertical-Cavity Surface Emitting Lasers) has applications such as free-space optical communications and laser range finding. Two different aperture diameters 980nm, bottom-emitting VCSELs were used. The peak current trace and corresponding peak optical trace are also tested and analyzed. The relationship between the electrical pulse width and optical pulse width are discussed. Peak output power has been arrived more than 20W at 980nm wavelength while pulse width is 60ns and pulse repetition frequency is 1kHz.

Key words: VCSELs; short pulse; peak power

1 引言

1977年,日本东京工业大学以 Kenichi Iga 教授为首的研究小组首次提出了垂直腔面发射激光器(vertical-cavity surface-emitting lasers, VCSELs)的概念^[1],在1984年他们实现了垂直腔面发射激光器的室温连续脉冲工作,又于1988年实现了垂直腔面发射激光器的室温连续(CW)工作。由于VCSEL具有制作工艺简单,光束质量好,波长稳定性高等优势,与边发射激光器相比,VCSELs具有更广的应用范围。在经历了短短的二十几年的发展之后,如今VCSELs的应用市场已经蓬勃发展起来,它们广泛应用于光通讯、光学扫描、光互联、激光鼠标、光谱分析、气体检测等方面。这些应用领域所需的VCSELs

的输出功率较小。

在大功率VCSELs方面,长春光机所采用新结构、新工艺等方法,首次实现VCSELs的瓦级功率输出,并于2004年实现了波长为980nm、口径分别为500 μm 和600 μm 的VCSELs单管室温连续工作光输出功率达到1.95W^[2]。美国普林斯顿光电子公司在提高VCSELs效率与功率方面开展了深入的研

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(No. 60636020); 国家自然科学基金项目(No. 60676034, 60706007, 60476029, 60577003); 吉林省科技发展项目(No. 20050318)资助。

作者简介: 彭航宇(1983-),男,现为长春光学精密机械与物理研究所硕士研究生,研究方向为大功率半导体激光及其应用技术。E-mail: imphy@163.com

收稿日期: 2007-10-11

究,通过优化P型DBR材料的组分、层数以及掺杂浓度,在保持低掺杂浓度以减小自由载流子吸收的同时,降低P型DBR的串联电阻,有效地提高了效率。该公司于2005年研制出器件口径为 $350\mu\text{m}$,室温下连续功率达到 $3\text{W}^{[3]}$,2007年,普林斯顿光电子公司又通过将大尺寸($5\text{mm} \times 5\text{mm}$)二维VCSELs阵列封装在高热导率金刚石热沉上,使VCSELs阵列达到非常高的功率水平。面积为 0.22cm^2 的二维阵列连续输出功率超过 230W ,功率密度大于 $1\text{kW}/\text{cm}^2$,阵列的谱宽(FWHM)为 $0.7 \sim 0.8\text{nm}$,效率达到 50% ,斜效率为 $0.95\text{W}/\text{A}$,微分串联电阻为 $5.8\text{m}\Omega$,热阻约为 $0.16^\circ\text{C}/\text{W}$,温度漂移系数小于 $0.07\text{nm}/^\circ\text{C}^{[4]}$ 。在脉冲宽度小于 $1\mu\text{s}$,占空比小于 5% 的脉冲下运行时,VCSELs可以获得更高的峰值输出功率,由于VCSELs出射面积与输出功率之比比边发射激光器要大的多,在相同的输出功率下,VCSEL的激光功率密度要远小于边发射激光器,因而VCSEL对端面损伤不敏感,这样就可以减少器件的光学灾变损伤(COD)和生产成本,可以获得很高的峰值输出功率。Aerius Photonics实现 980nm 单管脉冲峰值功率超过 60W 的VCSELs,芯片功率密度为 $20\text{kW}/\text{cm}^2$,出光孔径范围内的功率密度为 $62\text{kW}/\text{cm}^2$,脉冲能量为 $1.5\mu\text{J}$,重复频率为 $2\text{kHz}^{[5]}$ 。这种高峰值功率的VCSELs在自由空间光通信、激光测距、激光引信等方面具有广泛的应用前景。

2 实验原理

实验采用脉冲宽度为 60ns ,重复频率为 1kHz 的纳秒脉冲电流源来驱动VCSELs(如图1所示),测试了口径分别为 $400\mu\text{m}$ 以及 $600\mu\text{m}$ 的VCSELs。在短脉冲激发条件下测量了VCSELs的脉冲特性,光谱特性以及功率特性等。

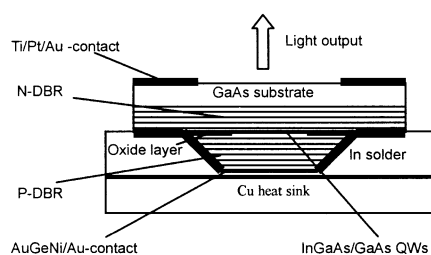


图1 底发射氧化物限制型VCSELs结构示意图

Fig. 1 bottom-emitting selectively-oxidized VCSELs structure

激光器的输出功率通常可以由下式表示^[6]:

$$P_{\text{out}} = \eta_d \times h\nu / q \times (I - I_{\text{th}}) \times (1 - \Delta T / T_{\text{off}}) \quad (1)$$

其中, η_d 是微分量子效率; $h\nu$ 是光子能量; q 是基本电荷; I 是注入电流; I_{th} 是阈值电流; ΔT 是内部温升;

T_{off} 是截止温度,等于 170K 。从上式可以得出激光器的输出功率与注入电流成正比,随内部温升而降低。

内部温升 ΔT 可表示为^[7]:

$$\Delta T = (I^2 R_s + IV_j) R_{\text{therm}} (1 - \eta) D \quad (2)$$

$$D = \text{PW} \times \text{PRF} \quad (3)$$

其中, I 是注入电流; R_s 是激光器的串联电阻; V_j 是激光器的结电压; R_{therm} 是热阻; η 是激光器的电光转换效率; D 是占空比(对于连续工作而言 $D=1$);PW是脉冲宽度;PRF是脉冲重复频率。可见在连续工作时激光器注入电流越大, ΔT 越大,在给定的阈值电流密度和热导条件下,光输出功率首先随着外加电流的增加而增加;接着,光输出功率达到最大值;然后,光输出功率呈下降趋势^[2]。而当激光器在脉冲条件下工作时,如果占空比很小,则激光器产生的内部温升就变得很小。在本论文中,我们使用的纳秒脉冲电流源最大占空比为 0.006% ,产生的内部温升可以忽略不计,因而与连续工作时不同,激光器在脉冲条件下运行时,输出功率与注入电流在很大的范围内呈线性关系。

图2给出了 $600\mu\text{m}$ VCSELs在重复频率为 1kHz ,脉冲宽度为 60ns 时,波长随注入电流的漂移情况,从图中可以看出注入脉冲电流从 $12 \sim 70\text{A}$ 变化时,激光波长从 968.3nm 漂移到 969.8nm ,只漂移了 1.47nm ,波长的平均红移速率只有为 $0.025\text{nm}/\text{A}$,而在文献^[2]中器件在连续工作时,波长的红移速率为 $0.8\text{nm}/\text{A}$,从波长的红移速率我们可以得出在纳秒脉冲下,电流增加对器件内部的热影响很小,符合开始的理论分析。

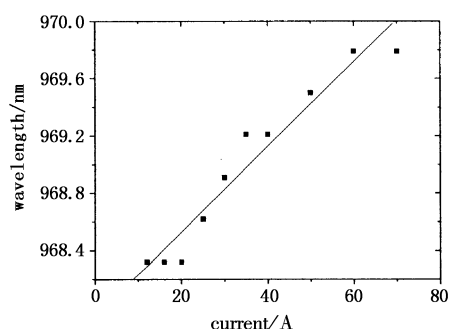


图2 在 $12 \sim 70\text{A}$ 之间器件的波长漂移

Fig. 2 VCSELs wavelength shift from 12A to 70A

3 器件测试与讨论

图3给出了口径为 $400\mu\text{m}$ 的VCSELs在重复频率为 1kHz ,脉冲宽度为 60ns 时注入电流的波形图,从图中可以看出,脉冲的上升沿时间较短,下降沿时间较长,最大驱动电流达到 73.6A 。图4给出口径

为 $400\mu\text{m}$ 的 VCSELs 相应得输出光脉冲的波形图, 峰值输出光功率达到 15.5W , 相应的光功率密度 $12.3\text{kW}/\text{cm}^2$, 从图中可以看到, 光脉冲的波形变化与电脉冲的波形变化较为符合。图 5 给出了不同电流下, 电脉冲宽度及光脉冲宽度的变化曲线, 从图中可以看出, 电脉冲宽度随电流增加缓慢上升, 电脉冲宽度从 50.4ns 增加到 54.6ns 。光脉冲宽度随注入电流增加存在一定的展宽, 光脉冲宽度从 45.2ns 增加到 68.4ns 。图 5 还给出了光脉冲相对于电脉冲的展宽比例, 光脉冲宽度的展宽在 0.9 倍至 1.3 倍之间。在低电流下, 光脉冲宽度与电脉冲宽度比较接近, 但是在高电流注入时, 光脉冲出现明显的展宽, 这是由达到高偏压所需的电流密度, VCSELs 的出光孔径, 以及半导体结型串联电阻之间复杂的相互关系造成^[5]。图 5 左上角的小图给出了器件输出功率特性曲线, 在室温 (24°C) 下, 73.6A 脉冲电流下实现 15.5W 的脉冲功率输出, 器件的斜线效率约为 $0.29\text{W}/\text{A}$ 。

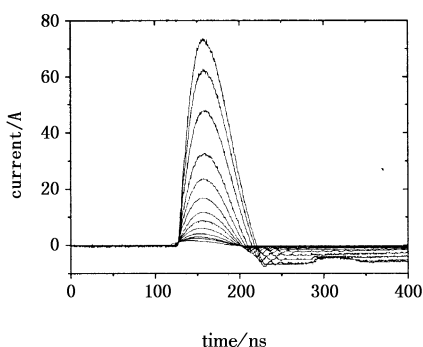


图 3 $400\mu\text{m}$ VCSELs 的注入电脉冲波形
Fig.3 $400\mu\text{m}$ VCSELs current pulse

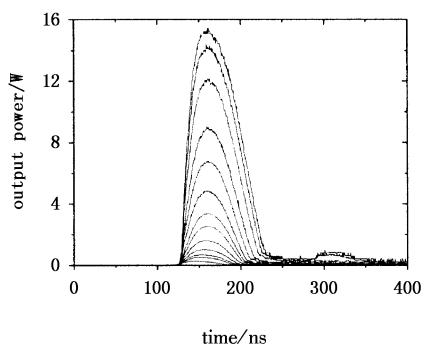


图 4 $400\mu\text{m}$ VCSELs 的输出光脉冲波形
Fig.4 $400\mu\text{m}$ VCSELs optical pulse

图 6 是研制出的出光孔径 $600\mu\text{m}$ 的器件输出功率特性曲线。在室温 (24°C) 下, 在 90A 脉冲电流下获得峰值光功率 27.2W , 光功率密度 $9.6\text{kW}/\text{cm}^2$, 器件的斜线效率为 $0.37\text{W}/\text{A}$ 。图 6 中的小图给出了 $600\mu\text{m}$ 的器件在连续电流注入时的 $P-I$ 曲线, 从

图中可以看到, 在连续工作时随着注入电流的增加, 器件的功率曲线出现翻转, 从 4A 开始, 连续条件下的输出功率开始小于脉冲条件下的峰值输出功率, 说明在纳秒脉冲下工作有助于提高 VCSELs 的峰值输出功率。

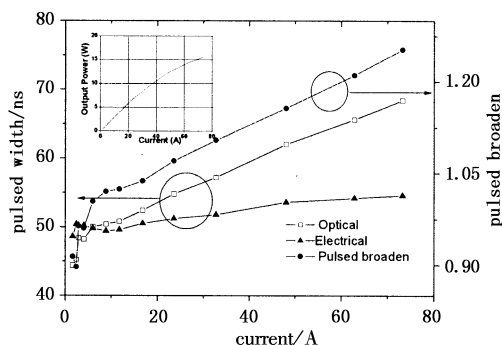


图 5 $400\mu\text{m}$ VCSELs 的电脉冲宽度及光脉冲宽度与电流的关系

Fig.5 $400\mu\text{m}$ VCSELs electrical pulse widths and optical pulse widths Vs. current

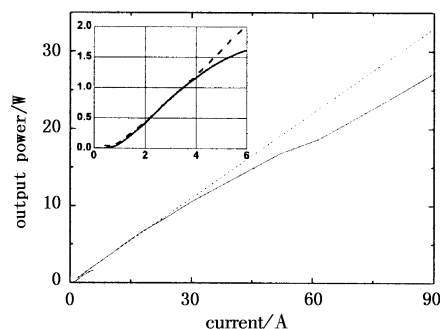


图 6 $600\mu\text{m}$ VCSELs 峰值输出功率与脉冲电流的关系

Fig.6 $600\mu\text{m}$ VCSELs peak pulse power Vs. current

在此基础上还测量和分析了 $600\mu\text{m}$ VCSELs 在重复频率为 1kHz , 脉冲宽度为 60ns , 注入电流为 40A 时的光谱, 图 7 给出了器件的激光光谱, 峰值波长为 976.6nm , 器件的光谱半高宽 (FWHM) 为 0.9nm 。

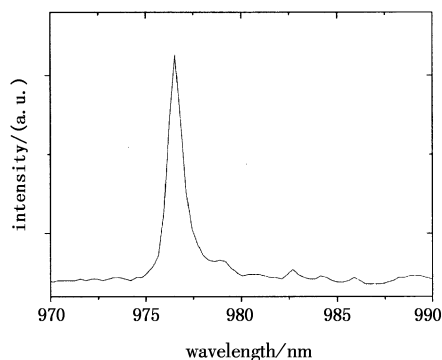


图 7 器件的激光光谱

Fig.7 lasing spectrum of the device

4 结 论

采用自行研制的 VCSELs, 获得较高的峰值输出功率。口径为 $400\mu\text{m}$ VCSELs 在重复频率为 1kHz , 脉冲宽度为 60ns , 峰值驱动电流为 73.6A 时, 获得峰值光功率 15.5W , 光功率密度 $12.3\text{kW}/\text{cm}^2$; 口径为 $600\mu\text{m}$ VCSELs 在重复频率为 1kHz , 脉冲宽度为 60ns , 峰值驱动电流为 90A 时, 获得峰值光功率 27.2W , 光功率密度 $9.6\text{kW}/\text{cm}^2$ 。除了可以达到很高的峰值功率以外, $600\mu\text{m}$ VCSELs 的峰值波长为 976.6nm , 器件的光谱半高宽 (FWHM) 为 0.9nm 。同时, 相对连续工作时, 在纳秒脉冲下运行时, 器件的波长红移速率较缓, 内部温升较慢, 更容易加大注入电流, 有助于提高光输出功率。

参考文献:

- [1] 伊贺建一, 小山二山夫. 面发射激光器的基础与应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2002, 7.
- [2] Sun Yanfang, Jin Zhenhua, et al. Fabrication and experi-

(上接第 423 页)

4 结 论

在聚碳酸酯 (PC) 基材中加入质量分数为 0.01% 的 VI530 和质量分数为 0.05% 的 IR1060, 通过注塑成型, 在制得的 PC 材料表面镀上 23 层激光反射膜, 制备出高性能的多波段激光防护 PC 材料。这种激光防护材料在紫外-可见-红外波段的多个激光波长处的光密度均大于 4, 能够同时对多个波长的激光起到有效地防护作用。同时, 这种激光防护材料具有很好地抗冲击强度和弯曲强度。完全可以满足作为激光防护材料的要求。

参考文献:

- [1] B Anderberg. Protection and countermeasures against laser weapons[J]. Military Technology, 1993, 5: 17-26.
- [2] 孟献丰, 陆春华, 张其土, 等. 激光防护材料的研究进展[J]. 激光与红外, 2005, 35(2): 71-73.
- [3] I L Bailey, M A Bullimore. A new test for evaluation of disability glare[J]. Option Vis. Sic., 1991, 68(12): 911-917.

mental characterization of high power bottom-emitting VCSELs[J]. Optics and Precision Engineering, 2004, 12(5): 449-453. (in Chinese)

- [3] L Arthur D' Asaro, Jean-Francois Seurin, James D Wynn. High-power, high-efficiency VCSELs pursue the goal[J]. Photonics Spectra, 2005, (2): 64-66.
- [4] Jean-Francois Seurin, L Arthur D' Asaro, Chuni Ghosh. A New Application for VCSELs: High-Power Pump Lasers[J]. Photonics Spectra, 2007, (7): 66-71.
- [5] Jon Geske, Michael MacDougall, Garrett Cole, et al. High power VCSELs for smart munitions[J]. Proc. SPIE, 2006, 6287, 628703.
- [6] Craig Angelos, Steven Hinckley, et al. Simulation of current spreading in bottom-emitting vertical cavity surface emitting lasers for high-power operation[J]. Proc. SPIE, 2005, 5277, 261-272.
- [7] Shigehisa ARAI, Yasuharu Suematsu. 1.11-1.67(100) GaInAsP/InP injection lasers prepared by liquid phase epitaxy[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1980, 16(2): 197-205.

- [4] K L Hayes, R J Thomas, R E Pingry, Jr. Optimization of optical density requirements for multiwavelength laser safety[J]. Journal of Laser Applications, 2006, 18(3): 275-282.
- [5] Y Barkana, M Belkin. Laser Eye Injuries[J]. Survey of ophthalmology, 2000, 44(6): 459-478.
- [6] 付伟. 强激光致盲研究[J]. 应用光学, 2001, 22(6): 17-22.
- [7] 金清理, 柯见洪, 薛漫芝. He-Ne 激光对人体伤害的分析及防护措施[J]. 激光技术, 2003, 27(2): 153-157.
- [8] Kenichi Takahashi. Anti-reflection coating for an infrared transmitting material[P]. US, Patent, 4721657, 1998(4): 721-657.
- [9] 赵江, 徐世录. 激光武器的现状与发展趋势[J]. 激光与红外, 2005, 35(2): 67-70.
- [10] Chen Ming, Li Chunfei, Xu Mai, et al. Eye-protection glasses against YAG laser injury based on the band gap reflection of one-dimensional photonic crystal[J]. Optics and Laser Technology, 2007, 39(1): 214-218.