

## 980 nm 高峰值功率微型化 VCSEL 脉冲激光光源

高世杰<sup>1,2</sup>, 张星<sup>3\*</sup>, 张建伟<sup>3</sup>, 张建<sup>3</sup>, 宁永强<sup>3</sup>, 吴坚<sup>4</sup>, 秦莉<sup>3</sup>, 佟存柱<sup>3</sup>, 王立军<sup>3</sup>

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

2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 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;

4. 北京航空航天大学 应用物理系, 北京 100191)

**摘要:**报道了输出波长 980 nm 的高峰值功率垂直腔面发射激光器 (VCSEL) 及其微型化脉冲激光光源。通过优化 VCSEL 单元器件的结构, 有效抑制了宽面 VCSEL 结构中的非均匀电流分布, 提高了单元器件的斜率效率, 获得了直径 400  $\mu\text{m}$ , 峰值输出功率 62 W 的 VCSEL 单元器件; 在此基础上, 研制出由单元器件组合封装而成的 VCSEL“准阵列”子模块以及集成驱动电路的微型化 VCSEL 脉冲激光光源, 该光源在脉冲驱动条件为 30 ns、2 kHz、105 A 条件下的峰值输出功率达到 226 W, 光脉冲宽度 35 ns, 中心波长 979.4 nm, 斜率效率达到 2.15 W/A。

**关键词:**垂直腔面发射激光器; 窄脉冲; 高峰值功率; 微型化

**中图分类号:** TN248.4 **文献标识码:** A

## Miniaturized VCSEL pulsed laser source with high peak power at 980 nm

GAO Shi-Jie<sup>1,2</sup>, ZHANG Xing<sup>3\*</sup>, ZHANG Jian-Wei<sup>3</sup>, ZHANG Jian<sup>3</sup>, NING Yong-Qiang<sup>3</sup>, WU Jian<sup>4</sup>,  
QIN Li<sup>3</sup>, TONG Cun-Zhu<sup>3</sup>, WANG Li-Jun<sup>3</sup>

(1. Opto-electrical Observe and Control Department, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,  
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. State Key Laboratory of Luminescence and Applications, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,  
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

4. Dept. of Applied Physics, Beihang University, Beijing, 100191, China)

**Abstract:** The VCSEL devices with high peak power at 980nm and miniaturized laser source were reported. The structure of VCSEL element devices was optimized to eliminate the non-uniform current density distribution within the VCSEL's active region and therefore to enhance the slope efficiency. The peak power with a value of 62 W was achieved from VCSEL element device with 400  $\mu\text{m}$ -diameter-active region. Based on the optimized element devices, VCSEL quasi array sub-mount and miniaturized laser source integrated with pulse generator circuit was demonstrated. Under the driving condition of 30 ns, 2 kHz, 105 A, the peak power as high as 226W was achieved. The laser pulse width, laser wavelength and the slope efficiency of the laser source were 35 ns, 979.4 nm and 2.15 W/A, respectively.

**Key words:** vertical-cavity surface-emitting lasers, narrow pulses, high peak power, miniaturized

**PACS:** 42.55. Px

收稿日期: 2015-08-09, 修回日期: 2016-01-19

Received date: 2015-08-09, revised date: 2016-01-19

基金项目: 国家自然科学基金 (61434005, 61474118, 61376070); 国家科技重大专项 (2014ZX04001151); 吉林省科技发展计划项目 (20150203011GX, 20140101203JC); 长春市科技计划项目 (14KG006, 15SS02)

**Foundation items:** Supported by National Natural Science Foundation of China (61434005, 61474118, 61376070); National Science and Technology Major Project of the Ministry of Industry and Information Technology of China (2014ZX04001151); Jilin Scientific and Technological Development Program (20150203011GX, 20140101203JC); Changchun Science and Technology Plan (14KG006, 15SS02)

作者简介 (Biography): 高世杰 (1979-), 男, 吉林抚松人, 副研究员, 博士研究生, 主要研究领域为光通信技术. E-mail: 13604329504@163.com

\* 通讯作者 (Corresponding author): E-mail: zhangx@ciomp.ac.cn

## 引言

垂直腔面发射激光器 (Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers, VCSEL) 具有对称的波导结构,能够输出高光束质量的圆形激光光斑,便于进行高密度二维集成,并且不会像边发射半导体激光器 (edge-emitting lasers) 那样受到腔面灾变光学损伤的影响<sup>[1]</sup>,作为一种替代边发射半导体激光器的理想高功率激光光源,VCSEL 近年来受到了国内外研究机构的广泛关注<sup>[2-7]</sup>. 目前高功率 VCSEL 器件的连续输出功率纪录由美国普林斯顿大学保持,他们报道了连续输出功率分别达到 3W 及 230W 的 VCSEL 单管及列阵器件<sup>[4,8]</sup>. 由于 VCSEL 连续工作的转换效率受到 DBR 自热效应的影响,导致其连续输出功率与斜率效率 (0.6 ~ 0.8 W/A) 很难与边发射半导体激光器 (>1.1 W/A) 相比,这限制了 VCSEL 在激光泵源等需要激光器连续工作 (continuous-wave, CW) 方面的应用前景. 但是,由于 VCSEL 能够避免受到光学灾变损伤的影响,且脉冲工作的上升时间短 (ns 级),响应速度更快,十分适合在激光测距、激光引信以及距离选通成像等需要高功率、窄脉冲激光的领域进行直接应用.

中科院长春光机所从 2010 年开始研制高峰值功率窄脉冲 VCSEL 光源,于 2011 年报道了单管脉冲峰值输出功率 92 W 和以及列阵脉冲输出 123W 的器件结果<sup>[9]</sup>,其中单管器件指标截止到目前为止仍是最高指标;国外方面,Naito 等报道了质子注入结构的窄脉冲 VCSEL 单管器件,峰值功率为 49 W<sup>[10]</sup>;采用相同方法获得的列阵器件峰值输出功率达到 200 W,但需要的驱动电流达到 400 A<sup>[7]</sup>. 目前国内外已经报道的器件结果在达到高峰值输出功率时其驱动电流要求也较高,主要是由于器件相对较低的斜率效率,这与目前引信或测距系统的实际应用需求有较大差距. 实际应用系统中普遍采用体积较小的低功率电压源,要求在相对较低的驱动电流条件下能够达到高峰值功率,这对于单一的 VCSEL 单管或列阵而言是很难实现的,也是目前此类器件推广应用的主要技术瓶颈之一.

针对实际应用需求,本文研究了具有高峰值功率的窄脉冲 VCSEL 激光光源. 首先对 VCSEL 单元器件的结构进行优化,调节了器件的电极结构进而有效提高了单元器件的性能,使其更适合于窄脉冲工作;采用单元器件串联封装结构在较低驱动电流条件下获得了高峰值功率;通过与脉冲波形产生模

块进行集成,最终获得了可进行直接应用的高峰值功率微型化 VCSEL 脉冲激光光源.

## 1 VCSEL 单元器件

本研究采用的 VCSEL 器件单元结构如图 1 所示,器件的外延结构采用中科院长春光机所的 AX-TRION 200/4 型金属—有机物化学气相沉积 (MOCVD) 设备生长而成. 针对高峰值输出功率的要求,有源区采用五组 InGaAs/GaAsP 量子阱,其中 In-GaAs 为阱层,GaAsP 为垒层;需要特别提到的是这里采用了带隙宽度更宽的 GaAsP 替代了通常使用的 GaAs,可以有效提高载流子的注入效率<sup>[11]</sup>. 激光器设计的室温工作波长为 976 nm,其中 P 型 DBR 包括 30 对 AlGaAs/GaAs,N 型 DBR 包括 20.5 对 AlGaAs/GaAs. 在 p 型 DBR 以及有源区之间生长了一层 30 nm 厚的 AlAs 层用于选择性氧化,以实现有效的电、光限制.

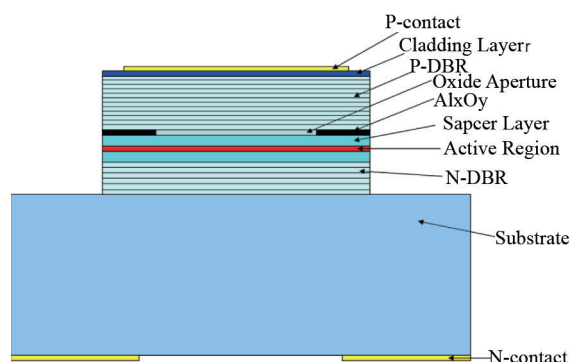


图 1 VCSEL 器件中多层结构的示意图

Fig. 1 Schematic of multi-layer structure in the VCSEL devices

为了获得高峰值输出功率的 VCSEL 器件,通常采用有源区尺寸较大 (>100  $\mu\text{m}$ ) 的宽面结构. 由于宽面结构中有源区的横向电流分布面积较大,会直接影响到器件内部的横向热分布和输出光束的质量,因此保持均匀的电流注入对提高 VCSEL 单元器件的性能尤为重要. 我们在前期的研究中发现 VCSEL 的电极尺寸对电流分布能够产生直接影响<sup>[12]</sup>,因此为了提高 VCSEL 单元器件的性能,首先对其 P 面电极尺寸进行了优化设计.

根据本节第一段描述的器件结构,基于商用三维有限元分析软件 ANSYS 构建了 VCSEL 的电场强度分析模型. 根据实际器件采用的参数,有源区直径的尺寸设定为 400  $\mu\text{m}$ ,P 面电极的尺寸分别设为与有源区直径相同的 400  $\mu\text{m}$  以及小于有源区直径的

350  $\mu\text{m}$  和 300  $\mu\text{m}$ . 通过设定电压边界以及器件多层结构的横向和纵向电导率条件计算获得了器件内部的电压分布,图 2 给出的是 P 面电极为 400  $\mu\text{m}$  时的计算结果,通过电压分布可进一步获得相应的注入电流分布. 我们分别计算了三种 p 面电极尺寸条件下,沿着 VCSEL 有源区径向的电流分布,如图 3 所示,可见当 P 面电极的直径与有源区直径相同时,在器件有源区的边缘出现了电流分布的尖峰,这不会增加器件输出光束的发散角,也会导致局部过热,降低斜率效率;当 P 面电极改变为 350  $\mu\text{m}$  时,可见电流分布尖峰被抑制;而当 P 面电极进一步下降到 300  $\mu\text{m}$  时,注入电流分布在有源区内的面积下降较多,同样会导致斜率效率的降低. 综合考虑,本研究选取的 VCSEL 单元器件 p 面电极直径为 350  $\mu\text{m}$ .

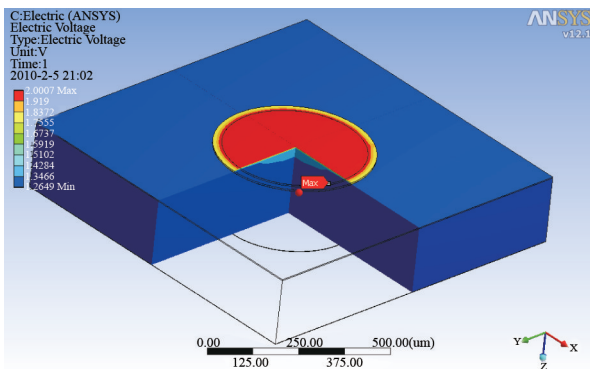


图 2 有源区直径 400  $\mu\text{m}$ , P 面电极直径 400  $\mu\text{m}$  VCSEL 单元器件的电压分布计算结果

Fig. 2 Simulation results of the voltage distribution in the VCSEL element device with 400  $\mu\text{m}$ -diameter-active region and 400  $\mu\text{m}$ -diameter p-contact

通过上述三维有限元电流密度分析的结果和电极尺寸的调整,我们实现了对单元器件有源区内部电流分布的优化. 随后开展了 VCSEL 器件的制备工艺,具体如下:采用电感耦合等离子体(ICP)刻蚀设备在外延片的 P 面刻蚀出圆形台面结构,随后在 420 $^{\circ}\text{C}$  水蒸气氛围下,通过湿法氧化形成氧化孔径,氧化孔径限定了器件有源区的直径. 由于湿法氧化存在一定工艺误差,经测试氧化孔径的实际直径小于设计值,约为 390  $\mu\text{m}$ . 采用等离子体增强气相沉积(PECVD)法沉积  $\text{SiO}_2$  对台面侧壁进行绝缘钝化后,采用 ICP 设备刻蚀掉台面上的部分  $\text{SiO}_2$ ,制作出电流注入的窗口,由图 1 的结构示意图可见 P 面电极主要是由  $\text{SiO}_2$  电流注入窗口的尺寸决定的. 考虑到需要在实验上对 P 面电极尺寸不同的 VCSEL 器

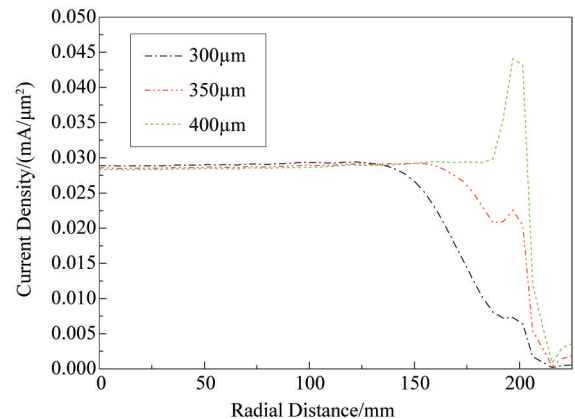


图 3 三种不同 P 面电极直径 VCSEL 器件有源区径向电流密度分布计算结果

Fig. 3 Simulated radial current density distributions within the active regions of VCSELs with different p-contact diameters

件进行对比,我们制作直径分别为 400  $\mu\text{m}$ 、350  $\mu\text{m}$  和 300  $\mu\text{m}$  的 P 面电极. 采用磁控溅射设备生长 P 面 TiPtAu 电极后,在器件的 N 面采用 PECVD 生长 980 nm 波段四分之一光学厚度的  $\text{Si}_3\text{N}_4$  薄膜作为增透层,通过双面对准光刻结合刻蚀和剥离工艺制备出发光窗口,最后进行快速热处理以形成 N 面和 P 面的电极欧姆接触.

经过在片测试筛选和解理封装之后,我们对 VCSEL 单元器件的性能进行了初步的测试分析. 为了观察三种器件内部热效应的影响,我们首先对三种器件进行了 50  $\mu\text{s}$ 、100 Hz、6 A 条件下的准连续(quasi continuous wave, QCW)测试,测试结果如图 4 所示. 由于准连续测试时器件输出功率受热效应影响较大,因此可见 P 面电极尺寸为 400  $\mu\text{m}$  的器件很快出现了热饱和(thermal roll-over),6 A 下的输出功率为 2.54 W,说明其有源区内部分布不均匀的电流密度导致局部温度过高;另外电极尺寸为 350  $\mu\text{m}$  及 300  $\mu\text{m}$  的器件未发生热饱和,其中 P 面电极直径为 350  $\mu\text{m}$  的器件输出功率最高,6 A 注入电流条件下达到 2.88 W.

我们进一步研究了 P 面电极直径 350  $\mu\text{m}$  器件在窄脉冲驱动条件下的输出特性,测试条件为 30 ns、2 kHz、95 A. 测试中采用了美国 THORLABS 公司的 PDA8A/M 硅光电探测器获得光脉冲波形,采用美国 COHERENT 公司的 3SIGMA 激光能量计测试激光脉冲的峰值能量. 图 5(a)所示为峰值输出功率的测试结果,从图中可见在窄脉冲驱动条件下,由于驱动占空比极低(0.06%),器件内部热效应的影响进一步降低,驱动电流逐渐加大并未使器件出现热

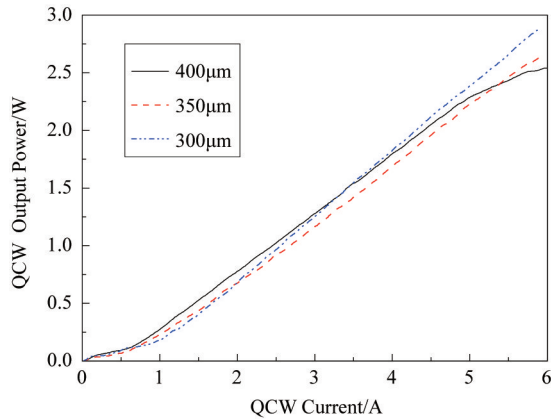


图4 三种 VCSEL 单元器件的准连续输出测试结果  
Fig.4 QCW output characteristics of three types of VCSEL element devices

饱和现象,此时输出功率的主要限制因素是脉冲电源的电流大小和器件本身的斜率效率.从图 5(a)中可见驱动电流为 95 A 时器件的输出功率达到 62 W,单元器件总体斜率效率相对较低(0.65 W/A).图 5(b)是激光脉冲波形,光脉冲的宽度为 30 ns.

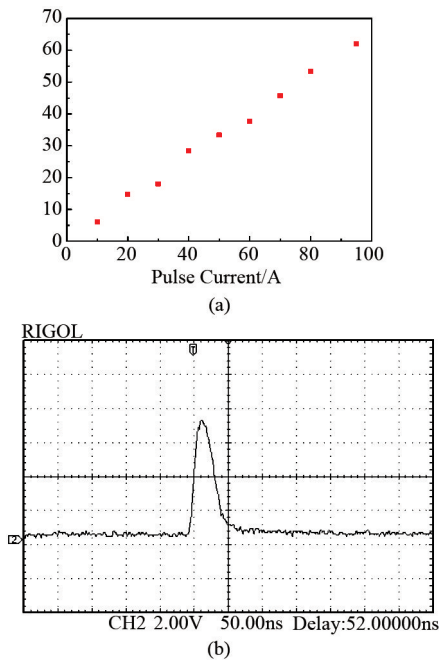


图5 P 面电极直径 350 µm VCSEL 单元器件窄脉冲输出特性:(a)脉冲输出电流—功率曲线;(b)激光脉冲波形  
Fig.5 Pulse output characteristics of VCSEL element devices with 350 µm-diameter p-contact; (a) pulsed light-current curve; (b) laser pulse waveform

## 2 微型化 VCSEL 光源模块

在激光引信、距离选通成像等实际应用中,受到驱动电源体积、功率的限制,需要激光光源在较低的

驱动电流下达到高峰值输出功率(即具有更高的斜率效率),并且希望激光光源方便集成.为此,我们基于上一节中获得的高峰值功率单元器件研制了微型化的 VCSEL 脉冲激光光源模块.

为了在提高光源模块输出斜率效率,我们将四个 VCSEL 单元器件串联封装到图形化的 AlN 热沉上,如图 6(a)所示,图形设计主要考虑到缩短单元器件之间的距离进而降低整个光源的体积,尽量减少键合金丝的长度以降低引入的电容和电感,并且微型化的光源模块易于进行后端光束整形.最终形成了 2×2 VCSEL“准列阵”子模块,在此基础上进一步通过子模块与脉冲波形发生电路的集成,最终获得了微型化 VCSEL 脉冲激光光源如图 6(b)所示.

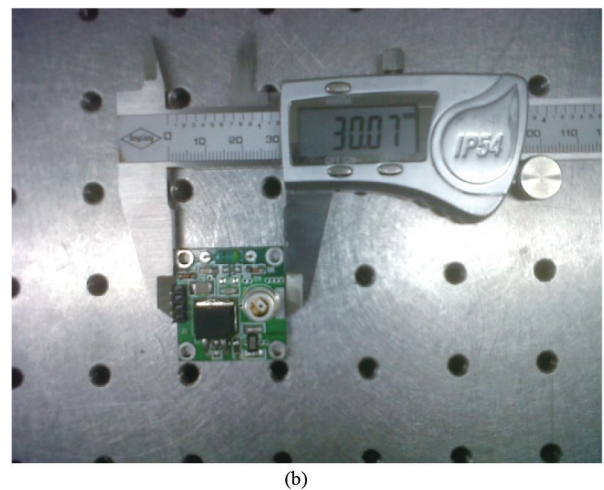
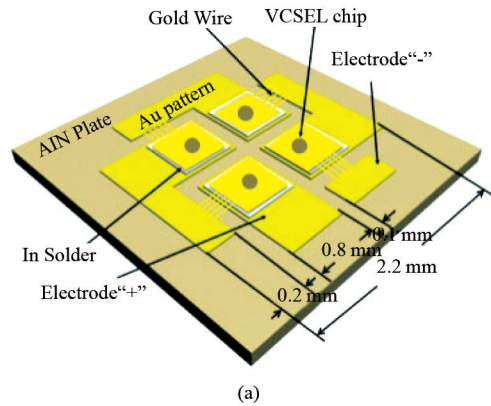


图6 (a)2×2 VCSEL“准列阵”子模块结构示意图 (b)集成脉冲发生电路的微型化 VCSEL 脉冲激光光源,尺寸为 30 cm×30 cm  
Fig.6 (a) Schematic of 2×2 VCSEL quasi-array sub-mount. (b) Miniaturized VCSEL pulse laser source integrated with pulse-generator circuit

我们对上述光源模块在与单元器件相同的脉冲驱动条件下进行了测试,得到的输出特性如图 7 所

示. 为了评估多个单元器件的串联结构对脉冲宽度的影响, 采用美国 IST 公司的 Model 711 霍尔线圈测试了加载在激光器两端的电脉冲信号波形, 与光脉冲波形进行了对比, 如图 8 所示. 从图 7 可见集成多个 VCSEL 单元器件的光源模块斜率效率获得了明显提高, 在驱动电流为 105 A 时输出的光脉冲宽度为 35 ns (图 8), 峰值输出功率达到 226 W (光脉冲能量为 7.92  $\mu\text{J}$ ), 对应的斜率效率为 2.15 W/A. 需要注意的一点是从图 8 可见输出的光脉冲宽度 (35

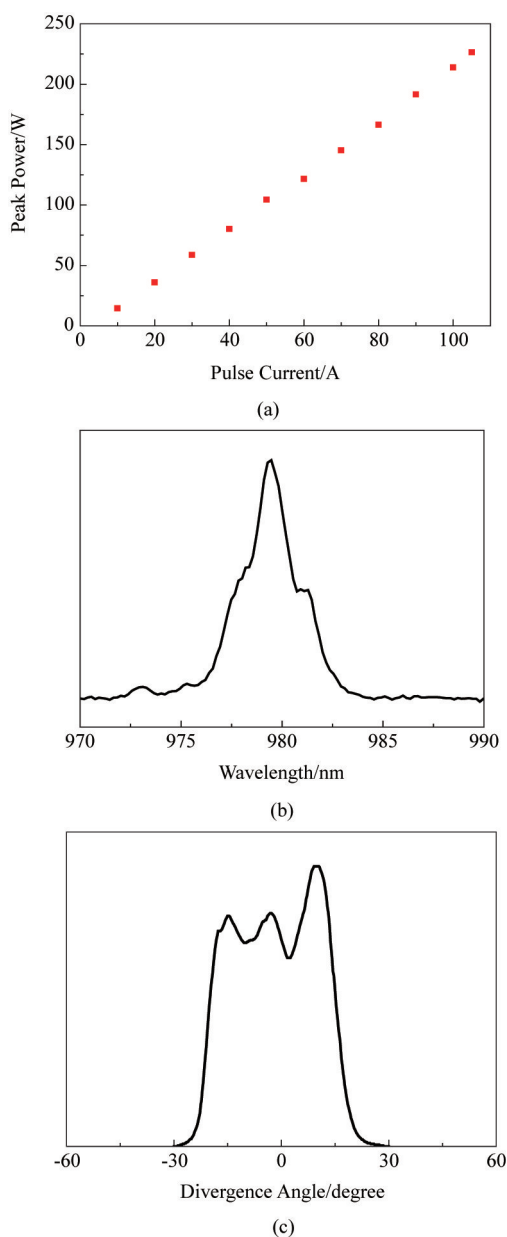


图 7 微型化 VCSEL 光源模块的脉冲输出特性测试结果. (a) 脉冲输出功率-电流曲线; (b) 激光中心波长; (c) 光束发散角

Fig. 7 Pulsed output characteristics of miniaturized VCSEL pulse laser source; (a) pulsed light-current curve; (b) laser wavelength; (c) beam divergence angle

ns) 比电脉冲 (30 ns) 略有展宽, 且上升时间  $> 10$  ns, 可见 VCSEL 光源模块整体的电容电感效应还需要继续降低以更好地满足使用要求; 此外由于此时光源模块中包含了脉冲波形发生模块, 脉冲电源的峰值电流值达到了 105 A, 比上一节单元器件测试时的 95 A 有所提高. 光源输出激光的中心波长为 979.4 nm, 远场发散角半宽为  $33^\circ$ , 较大的远场发散角是由于多个器件远场互相叠加导致的.

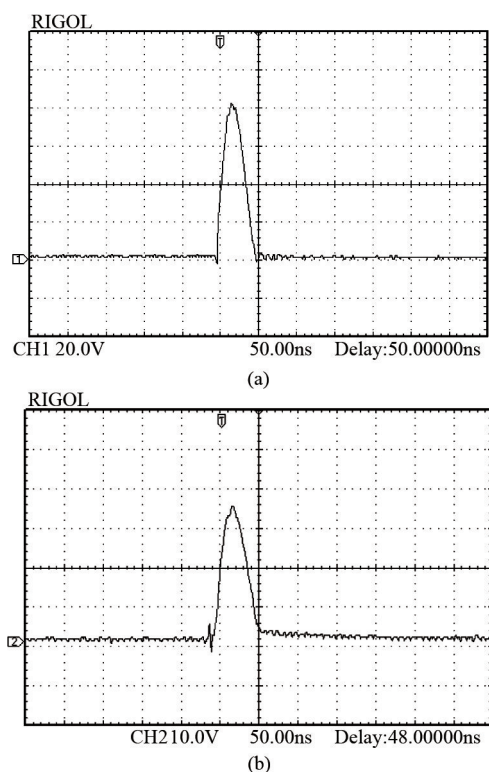


图 8 微型化 VCSEL 的输出激光脉冲波形. (a) 电脉冲波形; (b) 光脉冲波形

Fig. 8 Pulse waveform of the laser output from the miniaturized VCSEL pulse laser source; (a) electrical pulse; (b) optical pulse

### 3 结论

采用优化的 VCSEL 单元器件结构结合多器件组合的封装方式, 分别研制出了高功率 980 nm VCSEL 单元器件及微型化光源模块. VCSEL 单元器件的脉冲峰值输出功率达到 62 W, 微型化 VCSEL 脉冲激光光源模块在 30 ns、2 kHz、105 A 驱动条件下的峰值输出功率达到 226 W, 最高斜率效率达到 2.15 W/A, 激光中心波长为 979.4 nm, 光脉冲宽度为 35 ns. 研制出的高功率微型化 VCSEL 脉冲激光光源模块能够在激光引信、激光测距及距离选通成像等领域进行应用.

## References

- [1] GRABHERR M, MILLER M, MICHALZIK R, *et al.* High-power VCSELs: single devices and densely packed 2-D-arrays[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 1999, **5**(3): 495–502.
- [2] 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.
- [3] GESKE J, MACDOUGAL M, COLE G, *et al.* High-power VCSELs for smart munitions [C]. *Proceedings of SPIE*, 2006, **6287**(628703): 1–12.
- [4] SEURIN J F, GHOSH C L, KHALFIN V, *et al.* High-power vertical-cavity surface-emitting arrays [C]. *Proceedings of SPIE*, 2008, 6876(68760D).
- [5] SEURIN J F, XU G, GUO B M, *et al.* Efficient vertical-cavity surface-emitting lasers for infrared illumination applications [C]. *Proceedings of SPIE*, 2011, **7952**(7), 669–674.
- [6] MOENCH H, DEPPE C, DUMOULIN R, *et al.* Modular VCSEL solution for uniform line illumination in the kW range [C]. *Proceedings of SPIE*, 2012, **8241**(2), 161–167.
- [7] AOKI Y, MIYAMOTO M, NAITO H, *et al.* 200-W operation of an Ion-implanted vertical-cavity surface-emitting laser array [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2014, **50**(7): 510–514.
- [8] D'ASARO L A, SEURIN J F, WYNN J D, High-power, high efficiency VCSELs pursue the goal [J]. *Photonics Spectra*, 2005, (February), 64–66.
- [9] ZHANG L S, NING Y Q, ZENG Y G, *et al.* High-power bottom-emitting vertical-cavity surface-emitting lasers under continuous-wave, quasi-continuous-wave, and pulsed operation [J]. *Applied Physics Express*, 2011, **4**(5), 1166–1173.
- [10] OTAKE N, KOJIMA E, YAMADA H, *et al.* High-pulsed-power (49W) vertical-cavity surface-emitting laser with five quantum wells by uniform current injection into large emitting area [J]. *IEICE Electronics Express*, 2011, **8**(2): 109–113.
- [11] LIU D, NING Y Q, ZENG Y G, *et al.* High-power-density high-efficiency bottom-emitting vertical-cavity surface-emitting laser array [J]. *Applied Physics Express*, 2011, **4**(5), 1166–1173.
- [12] ZHANG X, NING Y Q, ZENG Y G, *et al.* 980-nm high-power low-divergence VCSELs achieved by optimization of current density distribution [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2012, **48**(1), 42–48.
- ~~~~~
- (上接第 563 页)
- [3] AZZAM R M A, BASHARA N M. *Ellipsometry and polarized light* [M]. Amsterdam: North-Holland Publishing Company, 1977, 153–156.
- [4] AZZAM, R M. Two-reflection null ellipsometer without a compensator [J]. *Journal of physics E: Scientific instruments* 1975, **9**: 596–572.
- [5] CHEN Liang-Yao, DAVID W L. Scanning ellipsometer by rotating polarizer and analyzer [J]. *Appl. Optics*, 1987, **26**(24): 5221–5238.
- [6] STOYAN C R, TZANIMIR V A. Rotating analyzer – fixed analyzer ellipsometer based on null type ellipsometer [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 1999, **70**(7): 3077–3083.
- [7] COLLINS R W, JOOHYUN K. Dual rotating-compensator multichannel ellipsometer; instrument design for real-time Mueller matrix spectroscopy of surfaces and films [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1999, **16**(8): 1997–2006.
- [8] LIU Shi-Yuan, CHEN Xiu-Guo, ZHANG Chuan-Wei. Development of a broadband Mueller matrix ellipsometer as a powerful tool for nanostructure metrology [J]. *Thin Solid Films*, 2015, **584**: 176–185.
- [9] JELLISON G E, JR., MODINE F A. Two-modulator generalized ellipsometry; theory [J]. *Appl. Optics*, 1997, **36**(31): 8190–8198.
- [10] ASPNES D E. Spectroscopic ellipsometry—Past, present, and future [J]. *Thin Solid Films*, 2014, **571**: 334–344.
- [11] CHEN Xiu-Guo, ZHANG Chuan-Wei, LIU Shi-Yuan. Depolarization effects from nanoimprinted grating structures as measured by Mueller matrix polarimetry [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2013, **103**(151605): 1–4.
- [12] CHEN Xiu-Guo, ZHANG Chuan-Wei, LIU Shi-Yuan, *et al.* Mueller matrix ellipsometric detection of profile asymmetry in nanoimprinted grating structures [J]. *J. Appl. Phys.*, 2014, **116**(194305): 1–7.
- [13] RODENHAUSEN K B, SCHMIDT D, KASPUTIS T, *et al.* Generalized ellipsometry in-situ quantification of organic adsorbate attachment within slanted columnar thin films [J]. *Opt. Express*, 2012, **20**(5): 5419–5428.
- [14] TAKASHI S, TAKESHI A, YOSHIHIRO S, *et al.* Compact ellipsometer employing a static polarimeter module with arrayed polarizer and wave-plate elements [J]. *Appl. Opt.*, 2007, **46**(22): 4963–4967.
- [15] SANG H Y, SOO H K, YOON K K, *et al.* Angle-resolved annular data acquisition method for microellipsometry [J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(26): 18056–18065.
- [16] KOOPS R, SONIN P, VEGHEL M V, *et al.* A compact new-concept ellipsometer for accurate large scale thin film measurements [J]. *J. Opt.*, 2014, **16**(065701): 1–9.
- [17] KAZAMA A, YAMADA Y, YAMADA T, *et al.* Compact and high-speed ellipsometer [J]. *Proc. SPIE*, 1992, **1681**: 183–188.
- [18] MAO Peng-Hui, ZHENG Yu-Xiang, CHEN Yue-Rui, *et al.* Study of the new ellipsometric measurement method using integrated analyzer in parallel mode [J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(10): 8641–8650.
- [19] AL-ASSAAD R M, BYRNE D M. Error analysis in inverse scatterometry. I. modeling [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2007, **24**(2): 326–338.
- [20] STEPHEN A C. *The science and engineering of microelectronic fabrication* [M]. New York: Oxford University Press, 2001.
- [21] WUBBELER G, KRYSSTEK M, ELSTER C. Evaluation of measurement uncertainty and its numerical calculation by a Monte Carlo method [J]. *Meas. Sci. Technol.*, 2008, **19**(084009): 1–4.