

文章编号 1004-924X(2012)01-0017-07

850 nm 垂直腔面发射激光器阵列

史晶晶^{1,2}, 秦莉¹, 宁永强¹, 刘云^{1*}, 张金龙¹, 曹军胜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:为了解决垂直腔面发射激光器(VCSEL)阵列中金丝难以键和和电流注入不均匀的问题,提出了一种非闭合型VCSEL阵列结构。该结构通过腐蚀非闭合环形凹槽形成器件台面,从而简化了工艺步骤,减少了器件的损伤。分别对 2×2 , 3×3 , 4×4 阵列的850 nm非闭合型顶发射VCSEL器件进行了测试和分析,结果显示其室温连续输出功率分别达到80,140和480 mW;阈值电流分别为0.15,0.25和0.4 A;平行方向和垂直方向上的远场发散角分别为 9° 和 9.6° , 13.5° 和 14.4° , 15° 和 14.4° 。在脉宽为50 μ s、重复频率为100 Hz时,最大输出功率分别为90,318和1 279 mW;阈值电流分别为0.2,0.5和0.7 A。分别测试了芯片在封装前后的功率曲线,发现芯片在封装之后的热饱和电流要远远高于封装之前,从而说明良好的封装技术可以提高器件的散热效率,降低器件内部发热对器件性能的影响。

关键词:垂直腔面发射激光器(VCSEL)阵列;非闭合阵列结构;电流注入;封装

中图分类号:TN248.1 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20122001.0017

850 nm vertical cavity surface-emitting laser arrays

SHI Jing-jing^{1,2}, QIN Li¹, NING Yong-qiang¹, LIU Yun^{1*},
ZHANG Jin-long¹, CAO Jun-sheng¹, WANG Li-jun¹

(1. *Key Laboratory of Excited State Processes, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*
2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*)

* *Corresponding author, E-mail: hx5252@sohu.com*

Abstract: To improve the wire bonding and homogeneous injecting currents, this paper proposes a Vertical Cavity Surface-emitting Laser (VCSEL) array with a non-closed structure. In this structure, a non-closed groove is etched to form a mesa for simplifying the processing and reducing the damage of devices. The 850 nm VCSEL arrays (including 2×2 , 3×3 and 4×4 array devices) with the non-closed type top emission structures are tested and analyzed. Results show that the continuous output powers are up to 80, 140 and 480 mW at room temperature, threshold currents are 0.15, 0.25 and 0.4 A, and the far-field divergence angles in parallel and vertical directions are 9° and 9.6° , 13.5° and 14.4° , 15° and 14.4° , respectively. In the context of a pulse width of 50 μ s and a pulse repetition rate of 100 Hz, the maximum output powers are 90, 318 and 1 279 mW and the threshold currents are 0.2, 0.5 and 0.7 A, respectively. The power curves of chips are

收稿日期:2011-04-11;修订日期:2011-05-26.

基金项目:国家自然科学基金重点项目(No. 90923037, No. 20100352);吉林省科技发展计划资助项目(No. 20080335);
苏州市科技发展计划资助项目(No. SYJG0904);苏州医工所筹建期专项基金资助项目(No. 091901L090)

tested before and after packaged. The result shows that the heat saturation current of the chip after packaged is much higher than that of the chip before packaged, which suggests that good packaging can improve the cooling efficiency and reduce the effect of internal heating on the device performance.

Key words: Vertical Cavity Surface-emitting Laser (VCSEL) array; non-closed array structure; current injection ; package

1 引言

近年来,垂直腔面发射激光器(Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers, VCSELs)发展迅速并以其低的阈值电流,高的调制频率和低的功率损耗等优点而倍受光通讯领域的青睐^[1-3]。目前,VCSELs 的应用主要集中在小功率场合,如光通讯,光互连,计算机与光信息处理等,但事实上 VCSELs 器件的大功率应用领域更为广阔,例如激光测距,激光雷达,激光引信和激光医疗等^[4-6]。

为了提高半导体激光器的输出功率,一般采用多个发光单元集成的方法。与传统的边发射半导体激光器相比,垂直腔面发射激光器列阵的制作更加简单,可以通过一次工艺流程完成,且不再需要额外的叠层堆砌技术。因此,VCSELs 列阵的制作成本远低于边发射半导体激光器叠阵^[7-9]。

由于 VCSELs 所使用的 GaAs 衬底对 850 nm 波段的光有强吸收,所以在这个波段的器件一般会采取顶发射结构。为了实现对光和电的限制,传统的闭合型顶发射结构会对有源区上部的氧化限制层进行湿法氧化,实施该项工艺需要暴露出氧化限制层,从而腐蚀出环形沟槽。由于环形沟槽的存在,金丝键合区域与环形电极区域不在一个连续的平面上,电流无法从金丝流经金丝键合区后从环形电极直接注入到有源区内部。为了解决这一问题,一般在湿法氧化工艺之后要在沟槽内填充聚酰亚胺或 BCB 等材料,用来对表面进行刻蚀使其平整,最后在平整的表面生长电极,由此使金丝键合区域与环形电极在一个连续的平面上,电流可以直接从金丝流经金丝键合区,然后从环形电极注入有源区。这一方法虽然解决了电流注入的问题,但是填充聚酰亚胺或 BCB 等材料影响器件的散热,并且表面平坦化所使用的刻蚀方法会损伤器件结构。

为了解决上述问题,本文提出了一种非闭合结构。该结构在暴露有源区上部氧化限制层时,不再

刻蚀完整的环形沟槽,而是刻蚀非闭合的环形沟槽。采用这种结构的器件,其金丝键合区域和电极区域仍在一个连续的平面上,电流可以从金丝流经金丝键合区域,然后从环形电极直接注入到有源区。这样器件不再需要填充聚酰亚胺和 BCB 等材料,也不再需要通过刻蚀使表面平坦化,从而避免了填充聚酰亚胺和 BCB 等材料带来的散热问题,也避免了刻蚀对器件结构造成的损伤。

2 器件结构及制作工艺

图 1 所示为传统的闭合型顶发射 VCSELs 结构与本文提出的非闭合型顶发射 VCSELs 结构的比较图,从图中可以清晰地看出本文所提出的非闭合型结构的优势。

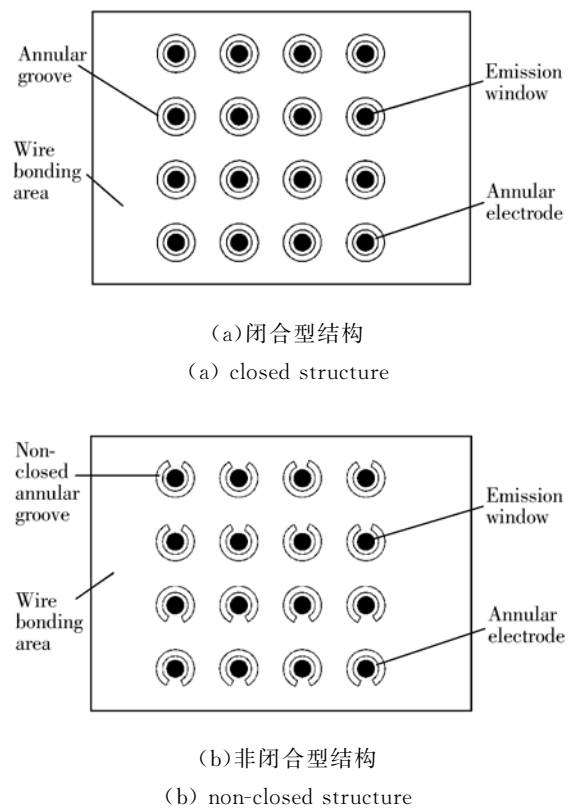


图 1 850 nm 顶发射 VCSEL 列阵表面示意图
Fig. 1 Schematics of 850 nm top-emitting VCSEL arrays

由于 VCSELs 列阵器件有热串扰现象,其发热问题要比单管器件严重得多,因此在设计 VCSELs 列阵时必须对此加以考虑。VCSELs 列阵之间的热串扰随列阵中发光单元间距的增加而减弱,直至达到饱和;另一方面,发光单元间距的增大又减小了器件的输出功率密度^[10-11]。基于以上考虑,本文将 VCSELs 列阵器件的台面设计为 $80\ \mu\text{m}$,发光单元间距为 $200\ \mu\text{m}$ 。

图 2 分别为 2×2 、 3×3 和 4×4 的 850 nm 顶发射 VCSELs 列阵器件芯片的照片。照片所示为器件的 p 面,即芯片的出光面。

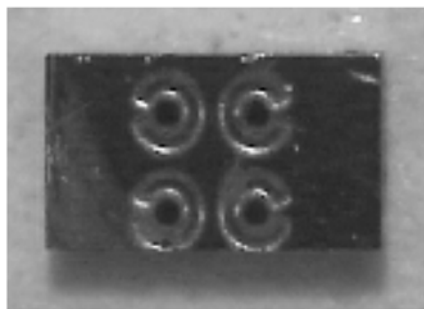
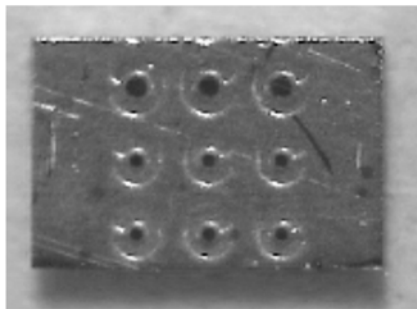
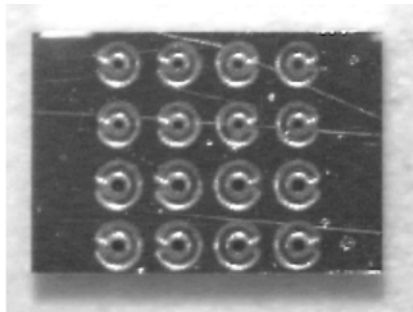
(a) 2×2 列阵(a) 2×2 array(b) 3×3 列阵(b) 3×3 array(c) 4×4 列阵(c) 4×4 array

图 2 850 nm 顶发射 VCSEL 列阵器件芯片照

Fig. 2 Photos of 850 nm top-emitting VCSEL arrays

本文所用芯片是通过金属有机物化学气相沉积(MOCVD)技术在 n 型 GaAs 衬底上生长而成的。由多个量子阱组成的有源区夹在 n 型和 p 型 DBR 之间, Si 掺杂的 n 型 DBR 由 34.5 对 $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}/\text{Al}_{0.12}\text{Ga}_{0.88}\text{As}$ 组成。有源区由 3 个量子阱组成, 垒厚 $8\ \text{nm}$, 材料为 $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$, 阱厚为 $6\ \text{nm}$, 材料为 GaAs。C 掺杂的 p 型 DBR 由 20 对 $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}/\text{Al}_{0.12}\text{Ga}_{0.88}\text{As}$ 组成, 用于输出激光光束。在有源层和顶部的 p 型 DBR 之间有一层 $30\ \text{nm}$ 厚的 $\text{Al}_{0.98}\text{Ga}_{0.02}\text{As}$ 层, 可以被氧化成 Al_xO_y , 从而实现对光和电流的限制。

首先对芯片 n 面的衬底进行减薄, 一般将衬底从原来的 $650\sim 700\ \mu\text{m}$ 减薄至 $300\sim 350\ \mu\text{m}$ 。然后在芯片的 p 面进行光刻, 将光刻板上的非闭合环形列阵复制到芯片上, 为下一步的刻蚀做好掩模。通过化学刻蚀的方法形成非闭合环形凹槽列阵, 刻蚀深度要求深于氧化限制层, 这样可以把氧化限制层暴露出来, 为湿法氧化工艺做好准备。将刻蚀好的芯片放入氧化炉内, 通入携带水汽的氮气, 加热氧化炉, 使氧化限制层中的 Al 与水反应生成氧化物, 严格控制各项参数条件和氧化时间, 使生成的氧化物层均匀致密又厚度合适。氧化之后在芯片表面覆盖一层 SiO_2 绝缘钝化层, 该层不可过薄也不可过厚, 太薄容易出现针孔, 导致漏电流的产生; 而太厚易给器件带来过多应力, 造成器件损伤。接着套刻圆形电极, 腐蚀掉电极内的 SiO_2 , 从而形成电流注入窗口; 套刻的圆形电极要略小于内环的台面, 以确保内环台面的侧壁有 SiO_2 绝缘钝化层的保护, 避免电流从内环台面侧壁直接流入衬底。接下来在 p 面上生长 Ti-Au 层作为 p 型电极, 并对芯片 n 面的衬底再次减薄, 一般这次减薄将衬底减至 $150\sim 180\ \mu\text{m}$ 。下一步芯片 p 面套刻出光窗口, 腐蚀掉窗口处的 Ti-Au 形成出光窗口, 接着控制环境温度和湿度以及腐蚀液配比, 该化学腐蚀反应不可过快也不可过慢, 若反应过快则不宜控制反应时间, 若反应过慢则容易造成侧蚀。经过大量实验得出了腐蚀液的最优化配比, 腐蚀金属 $\text{Ti}:\text{HF}:\text{NH}_3:\text{H}_2\text{O}=1:2:60$, 腐蚀金属 $\text{Au}:\text{I}_2:\text{KI}:\text{H}_2\text{O}=1\text{g}:4\text{g}:8\text{ml}$; 在衬底上生长 Au-Ge-Ni 作为 n 型电极。最后进行合金化、解理、初测、压焊和封装。

3 器件测试与分析

对器件进行了测试,分别测试了 2×2 列阵, 3×3 列阵和 4×4 列阵的阈值电流,连续输出功率等参数,器件出光孔径均为 $80\ \mu\text{m}$,整理各项参数如表 1 所示。

表 1 出光窗口为 $80\ \mu\text{m}$ 的 $850\ \text{nm}$ VCSELs 列阵的连续测试数据

Tab. 1 CW parameters of $850\ \text{nm}$ VCSEL arrays with $80\ \mu\text{m}$ emission window

| 序号 | 列阵类型 | 阈值电流/A | 峰值功率/mW |
|----|-------------|--------|---------|
| 1 | 2×2 | 0.15 | 80 |
| 2 | 3×3 | 0.25 | 140 |
| 3 | 4×4 | 0.4 | 480 |

图 3 为 $850\ \text{nm}$ 顶发射 VCSELs 列阵器件连续输出的功率-电流图(P-I)。 2×2 列阵器件的阈值电流为 $0.15\ \text{A}$,峰值连续输出功率为 $80\ \text{mW}$,热饱和和电流为 $0.7\ \text{A}$; 3×3 列阵的阈值电流为 $0.25\ \text{A}$,峰值连续输出功率为 $140\ \text{mW}$,热饱和和电流为 $1.4\ \text{A}$; 4×4 列阵的阈值电流为 $0.4\ \text{A}$,峰值连续输出功率为 $480\ \text{mW}$,热饱和和电流为 $2.3\ \text{A}$ 。日本的 Masahiro Yoshikawa 等人在 2005 年的 Electronic Components and Technology Conference 上介绍了他们研制的闭合型 $850\ \text{nm}$ 顶发射 VCSELs 列阵,其 2×2 、 3×3 和 4×4 列阵的最高输出功率分别为 10 、 20 和 $40\ \text{mW}$ ^[12]。与该器件相

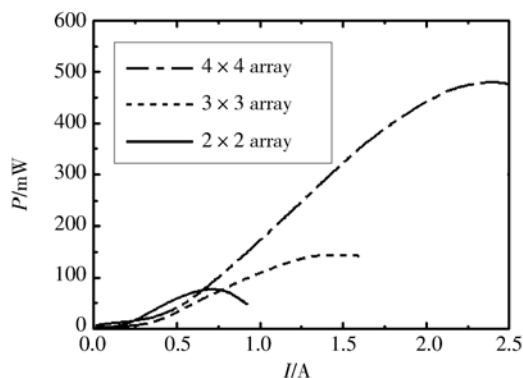
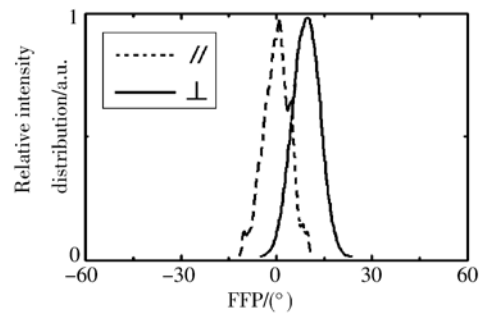


图 3 $850\ \text{nm}$ 顶发射 VCSELs 列阵器件连续功率-电流曲线

Fig. 3 CW current-power curves of $850\ \text{nm}$ top-emitting VCSEL arrays

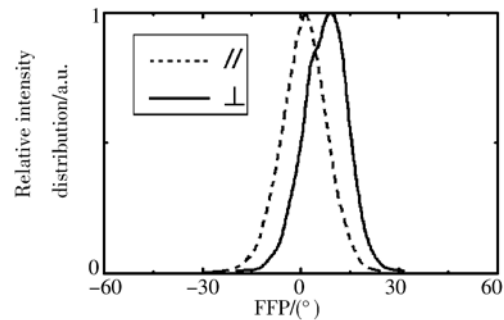
比,本文所研制器件的输出功率大大提高,功率的提高一方面与器件台面尺寸相关;另一方面是因为所采用的非闭合结构提高了器件的电流注入效率,使电流更为有效地注入到有源区,从而提高了器件的输出功率。随着器件集成发光单元的增多,器件的阈值电流增加,功率增大,相应的热饱和和电流也有所增大。

图 4 分别为 2×2 列阵器件, 3×3 列阵器件和 4×4 列阵器件在平行方向和垂直方向的远场



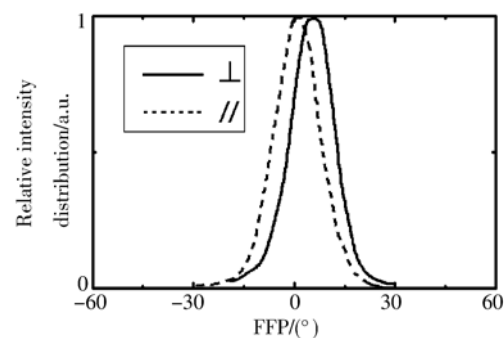
(a) 2×2 列阵器件

(a) 2×2 arrays



(b) 3×3 列阵器件

(b) 3×3 arrays



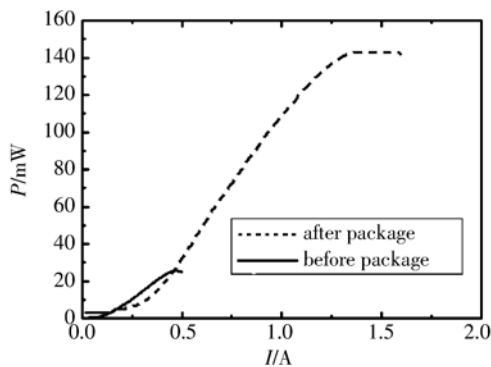
(c) 4×4 列阵器件

(c) 4×4 arrays

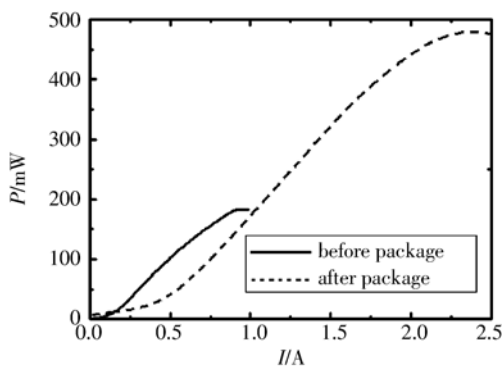
图 4 $850\ \text{nm}$ 顶发射 VCSELs 列阵器件的远场发散角

Fig. 4 Divergence angle of $850\ \text{nm}$ top-emitting VCSELs arrays

发散角。 2×2 列阵器件在平行方向和垂直方向上的远场发散角分别为 9° 和 9.6° , 见图 4(a); 3×3 列阵器件在平行方向和垂直方向上的远场发散角 (FFP) 分别为 13.5° 和 14.4° 见图 4(b); 4×4 列阵器件在平行方向和垂直方向上的远场发散角分别为 15° 和 14.4° 见图 4(c)。随着集成发光单元数目的增多, 器件的远场发散角稍有增大。器件在平行方向和垂直方向的远场发散角相差不大, 说明器件所发出的光束为近圆形光束。Masahiro Yoshikawa 等人研制的闭合型 850 nm VCSELs 顶发射列阵器件的远场发散角为 25° , 与之相比, 作者所研制器件的远场发散角大大减小, 这是因为这里所采用的非闭合结构提高了电流注入效率, 使有源区电流分布均匀, 从而改善了光束质量, 减小了远场发散角。



(a) 3×3 列阵器件
(a) 3×3 arrays



(b) 4×4 列阵器件
(b) 4×4 arrays

图 5 850 nm 顶发射 VCSEL 列阵器件封装前后比较图
Fig. 5 Comparison of 850 nm top-emitting VCSELs arrays with and without package

图 5 为 850 nm 顶发射 VCSELs 列阵器件在封装前后的比较图。从图中可以看出, 封装前的器件在很小的注入电流下就已经达到了饱和, 即使再继续增大注入电流, 功率也不会随之增加; 而封装后的器件虽然也会达到饱和, 但是达到饱和所需的电流却大大提高。这是因为器件在经过封装后, 所采取的各种散热方法大大提高了器件的散热效率, 使器件内部产生的热量能够有效传出, 这不仅使器件的热饱和和电流增大, 同时降低了热对器件其它性能的影响。

图 6 为 850 nm 顶发射 VCSEL 4×4 列阵器件的发射光谱图。器件发射波长为 848.8 nm, 光谱半高宽为 2.3 nm。

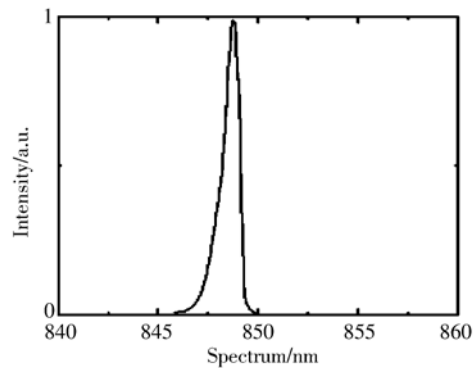


图 6 850 nm 顶发射 VCSELs 4×4 列阵器件的发射光谱图

Fig. 6 Lasing spectra of 850 nm top-emitting 4×4 VCSEL arrays

表 2 出光口为 $80 \mu\text{m}$ 的 850 nm VCSELs 列阵的脉冲测试数据

Tab. 2 Pulse parameters of 850 nm top-emitting VCSEL arrays with $80 \mu\text{m}$ emission window

| 序号 | 列阵类型 | 阈值电流/A | 峰值功率/mW |
|----|--------------|--------|---------|
| 1 | 2×2 | 0.2 | 90 |
| 2 | 3×3 | 0.5 | 318 |
| 3 | 4×4 | 0.7 | 1 279 |

表 2 是出光窗口为 $80 \mu\text{m}$ 的 850 nm VCSEL 列阵器件的脉冲测试数据, 脉宽为 $50 \mu\text{s}$, 重复频率为 100 Hz。图 7 为 850 nm 顶发射 VCSEL 器件的脉冲功率曲线。从图中可以看出, 2×2 列阵器件的阈值电流为 0.2 A, 在注入电流为 2.5 A 时

达到了功率饱和,最大输出功率为 90 mW; 3×3 列阵器件的阈值电流为 0.5 A,在注入电流为 2.5 A 时达到功率饱和,最大输出功率为 318 mW; 4×4 列阵器件的阈值电流为 0.7 A,在注入电流为 4 A 时达到功率饱和,最大输出功率为 1 279 mW。可见,随着列阵器件集成发光单元数的增加,阈值电流会随之增加,最大输出功率会随之增加,但是使器件达到功率饱和的注入电流值也会随之增加。

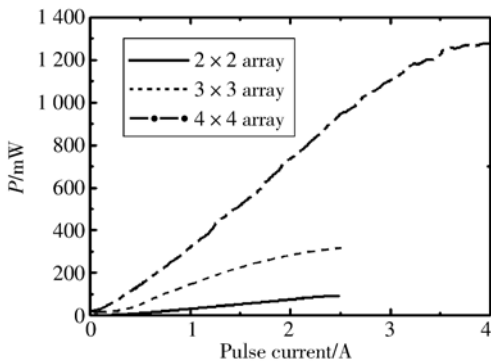


图 7 850 nm 顶发射 VCSELs 列阵脉冲功率曲线

Fig. 7 Pulse current-power curves of 850 nm top-emitting VCSEL arrays

参考文献:

- [1] CHOW W W, CHOQUETTE K D, CRAWFORD M H, *et al.*. Design, fabrication, and performance of infrared and visible vertical-cavity surface-emitting lasers[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1997, 33(10): 1810-1824.
- [2] IGA K, ISHIKAWA S, OHKOUCHI S, *et al.*. Room-temperature pulsed oscillation of GaAlAs/GaAs surface-emitting injection laser[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1984, 45: 348-350.
- [3] 王祥鹏,梁雪梅,李再金,等. 880 nm 半导体激光器列阵及光纤耦合模块[J]. *光学精密工程*, 2010, 18(5): 1021-1027.
WANG X P, LIANG X M, LI Z J, *et al.*. 880 nm semiconductor laser diode arrays and fiber coupling module[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(5): 1021-1027. (in Chinese)
- [4] 王焯,张岩,秦莉,等. 高功率半导体激光器列阵封装引入应变的测量[J]. *光学精密工程*, 2010, 8(9): 1951-1958.
WANG Y, ZHANG Y, QIN L, *et al.*. Measure-
- ment of packaging-induced strain in high power diode laser bar[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(9): 1951-1958. (in Chinese)
- [5] YAMADA M, ANAN T, KURHARA K. Room temperature low-threshold CW operation of 1.23 μm GaAsSb VCSELs on GaAs substrates[J]. *Electron Lett*, 2000, 36(7): 637-638.
- [6] JEON H, KOZLOV V, KELKAR P. Room temperature optically pumped bluegreen vertical cavity surface emitting lasers[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1995, 67(12): 1668-1670.
- [7] 吕亮,张可,戴绩俊,等. 基于垂直腔面发射半导体激光器的自混合测速实验[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(1): 23-28.
LV L, ZHANG K, DAI J J, *et al.*. Self-mixing velocimetry based on vertical-cavity surface-emitting laser[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(1): 23-28. (in Chinese)
- [8] WIPIEJEWSKI T, YOUNG D B, THIBEAULT B J, *et al.*. Thermal crosstalk in 4 vertical-cavity surface-emitting laser arrays[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1996, 8(8): 980-982.

4 结 论

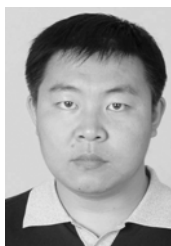
本文提出了非闭合型 VCSELs 列阵结构以解决金丝键合困难和注入电流不均匀的问题,该结构简化了工艺步骤,减少了器件损伤。对 850 nm 非闭合型顶发射 VCSELs 列阵器件进行了测试和分析。分别测试了 2×2 、 3×3 和 4×4 列阵器件,其室温连续输出功率分别达到 80, 140 和 480 mW,与之前报道的闭合型结构 VCSELs 列阵相比大大提高;阈值电流分别为 0.15, 0.25 和 0.4 A,平行方向和垂直方向上的远场发散角分别为 9° 和 9.6° 、 13.5° 和 14.4° 、 15° 和 14.4° ,与之前报道的闭合型结构 VCSELs 列阵相比大大减小;在脉宽为 50 μs 、重复频率为 100 Hz 的脉冲条件下,最大输出功率分别为 90, 318 和 1 279 mW,阈值电流分别为 0.2, 0.5 和 0.7 A。分别测试了芯片在封装前后的功率曲线,发现芯片在封装之后的热饱和电流要远远高于封装之前,从而说明良好的封装技术可以提高器件的散热效率,降低器件内部发热对器件性能的影响。实验证明这种非闭合的列阵器件结构能够表现出良好的性能。

- [9] ZOU Y, THORNTON R, TRAMONTANA J. High density, high power arrays of vertical cavity surface emitting lasers operating at 850 nm[C]. In *Proc. IEEE LEOS Annu. Meet., San Francisco, CA, Oct., 1995*: 443-444.
- [10] CHU K M, CHOI J H, LEE J S, *et al.*. Optoelectronic and microwave characteristics of silver coated indium bumps for temperature flip-chip applications[J]. *IEEE Electronics Letters*, 2004, 40 (23): 1508-1509.
- [11] AMANN M C, WERNER H. InP-based long-wavelength VCSELs and VCSEL arrays [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2009, 15(3): 861-868.
- [12] MASAHIRO Y, AKEMI M, JUN S, *et al.*. High power VCSEL devices for space optical communications [C]. *IEEE Electronic Components and Technology Conference*, 2005:1353-1358.

作者简介:



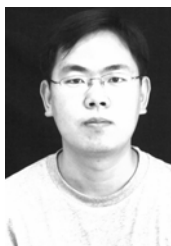
史晶晶(1982—),女,黑龙江七台河人,博士研究生,2006年于吉林大学获得学士学位,主要从事半导体光电子器件方面的研究。E-mail:shijj_19820530@yahoo.com.cn



张金龙(1975—),男,吉林舒兰人,理学硕士,工程师,主要从事无铝量子阱边发射大功率半导体激光器及散热、封装、镀膜工艺的研究和开发。E-mail:pled3588@yahoo.com.cn



秦莉(1969—),女,黑龙江鹤岗人,研究员,主要从事大功率垂直腔面发射激光器及应用方面的研究。E-mail:qinlicomp@yahoo.com.cn



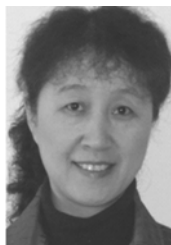
曹军胜(1978—),男,陕西延川人,博士,副研究员,主要从事半导体激光器应用的研究。E-mail:caojcs@jlu.edu.cn



宁永强(1965—),男,吉林省吉林市人,研究员,主要从事半导体光电子器件等方面的研究。E-mail:ningyq@ciomp.ac.cn



王立军(1946—),男,吉林长春人,研究员,博士生导师,1988年6月—1989年6月在瑞士邮政电报电话公司工作;1993年2月—1995年6月在美国西北大学量子器件中心做访问教授,主要从事大功率半导体激光器及其应用方面的研究。E-mail:wanglj@ciomp.ac.cn



刘云(1960—),女,吉林长春人,副研究员,主要从事大功率半导体激光阵列技术的研究。E-mail:hx5252@sohu.com