

高密度排列大功率垂直腔面发射激光器列阵*

王青[†] 曹玉莲 何国荣 韦欣 渠红伟 宋国峰 马文全 陈良惠

(中国科学院半导体研究所 纳米光电子实验室, 北京 100083)

摘要: 报道了 980nm 高密度排列大功率垂直腔面发射激光器列阵的研制. 列阵单元为蜂窝状堆积排列, 单元台面直径为 $70\mu\text{m}$, 氧化孔径为 $30\mu\text{m}$, 相邻单元间隔为 $100\mu\text{m}$. 制作了含 7, 19, 37 个单元的列阵, 讨论了它们的阈值电流和远场特性. 在室温连续工作条件下, 3 种列阵的最大输出功率分别为 0.26, 0.5 和 0.6W. 其中含 37 个单元的列阵在 6A 脉冲电流(脉宽 $30\mu\text{s}$, 重复频率 100Hz)激发下, 输出功率达到 1.4W.

关键词: 垂直腔面发射激光器; 列阵; 阈值电流; 发散角; 大功率

PACC: 4255P; 4260B

EEACC: 4320J

中图分类号: TN248.4

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2007)11-1803-04

1 引言

1988 年, Iga 等人^[1] 实现了垂直腔面发射激光器的室温连续激射, 经过近 20 年的发展, VCSEL 已成为半导体激光器领域的重要成员. 目前, 商品化的 VCSEL 已经广泛应用于光纤通信领域, 这些器件的有源区尺寸一般小于 $20\mu\text{m}$, 发光功率小于 100mW, 属于小功率器件. 随着外延生长和器件工艺技术的进步, 大功率 VCSEL 的研究也逐渐成为热点. 与传统的大功率边发射半导体激光器相比, 大功率 VCSEL 有自己独特的优点: (1) 光束质量高, 发散角小, 近圆形的光场非常容易与光纤耦合; (2) 采用分布布拉格反馈反射镜(DBR), 且出光窗口较大, 大功率输出时无灾变性光学损伤; (3) 烧结封装时在热沉上的位置不需严格要求, 不存在热沉遮光的问题. 正是由于这些优点, 大功率 VCSEL 可以广泛应用于自由空间通信、激光打印、激光泵浦、激光雕刻等领域. 要提高 VCSEL 的输出功率, 最直接的方法就是增大 VCSEL 的总发光面积, 这可以通过两种途径来实现: (1) 增大单个 VCSEL 的有源区面积^[2,3]; (2) 用较小的发光单元组成单片的 2-D VCSEL 列阵^[4,5]. 而在各种 VCSEL 列阵的排列结构中, 蜂窝状高密度排列不仅可以增大单片 VCSEL 列阵的集成度, 节省外延片, 而且可以使发光单元之间的热串扰均匀化^[6], 是大功率 VCSEL 列阵的未来发展方向, 但是国内并未见相关文献报道. 本文报道了自行研制的高密度排列大功率 VCSEL 列阵, 采用湿氮氧化工艺和底部发射结构, 单个发光单元

台面直径为 $70\mu\text{m}$, 氧化孔径为 $30\mu\text{m}$, 相邻单元间隔为 $100\mu\text{m}$, 按蜂窝状分别排列成 7, 19, 37 个单元的列阵, 其室温连续输出最大功率分别为 0.26, 0.5 和 0.6W, 激射波长均为 980nm 附近. 另外, 本文对这些器件的阈值、发散角等特性也做了详尽分析.

2 器件结构和制作

本文所使用的外延片由 MOCVD 系统生长而成. 外延片的结构和 VCSEL 列阵的排列如图 1 所示.

外延片的主要外延层依次为: Si 掺杂的 28 对 n 型 DBR, 采用组分渐变来减小串联电阻, 具体为 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ($x = 0.12 \rightarrow 0.9$)/ $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$ / $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ($x = 0.9 \rightarrow 0.12$)/ $\text{Al}_{0.12}\text{Ga}_{0.88}\text{As}$; 包含 3 个 $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}/\text{GaAs}_{0.92}\text{P}_{0.08}$ 应变补偿量子阱的光学谐振腔, 量子阱宽为 6nm, 垒宽 8nm, 通过空间层的厚度调整使光学谐振腔的厚度为 980nm; C 掺杂的 30.5 对 p 型 DBR, 同样采用与 n 型 DBR 相同的组分渐变技术; 光学谐振腔与 p 型 DBR 之间插入一层 30nm 厚的 $\text{Al}_{0.98}\text{Ga}_{0.02}\text{As}$ 层以便进行湿法氧化. 其中 DBR 的反射谱中心波长设计为 980nm.

如图 1 所示, 列阵单元台面直径为 $70\mu\text{m}$, 氧化孔径为 $30\mu\text{m}$, 相邻单元中心间隔为 $100\mu\text{m}$, 单元排列成六角蜂窝状. 具体制作过程如下: 首先进行 p 面工艺制作, 通过常规光刻方法在外延片上刻出蜂窝状列阵图形; 用湿氮化学腐蚀方法形成台面, 腐蚀深度以刚超过 $\text{Al}_{0.98}\text{Ga}_{0.02}\text{As}$ 层为宜. 高温 430°C 下, 由氮气携带 90°C 水蒸气对露出的 $\text{Al}_{0.98}\text{Ga}_{0.02}\text{As}$ 层

* 国家自然科学基金重点资助项目(批准号:60636030)

[†] 通信作者. Email: wangqing@mail.semi.ac.cn

2007-04-09 收到, 2007-05-16 定稿

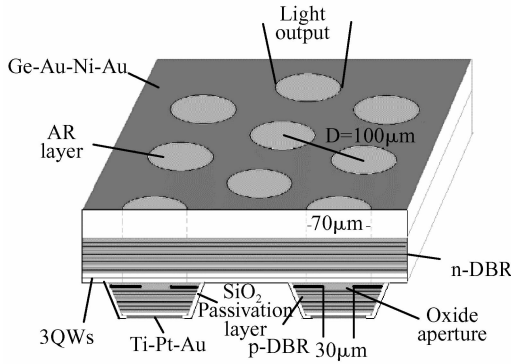


图 1 高密度排列垂直腔面发射激光器阵列示意图

Fig.1 Schematic drawing of a densely packed VCSEL array

进行侧向湿氮氧化形成氧化孔径,氧化深度约 $20\mu\text{m}$;大面积淀积 $200\sim 300\text{nm}$ 的 SiO_2 以形成绝缘层;采用套刻工艺腐蚀掉台面上的 SiO_2 以形成电极窗口;大面积溅射 Ti-Pt-Au 作为 p 型电极;因为器件是从衬底出光,为了减少衬底对光的损耗,将 n 型衬底减薄并抛光至 $150\mu\text{m}$ 左右;采用对准光刻的工艺将出光窗口图形与 p 面的台面对齐;蒸发 Ge-Au-Ni-Au 作为 n 型电极,并剥离掉出光孔上的电极;在各出光窗口上镀 ZrO_2 作为抗反膜,以保护出光面和提高输出功率;最后,将解理后的管芯的 p 面使用 In 焊料烧结在无氧铜热沉上.

3 器件测试结果与分析

我们同一批制作了分别含 7,19,37 个单元的阵列,图 2 为含 19 个单元的阵列的激光光谱图,测试电流为直流 2A,环境温度为室温.测得激光中心波长为 979.2nm ,半高宽为 1.2nm ,基本与设计波长相符.

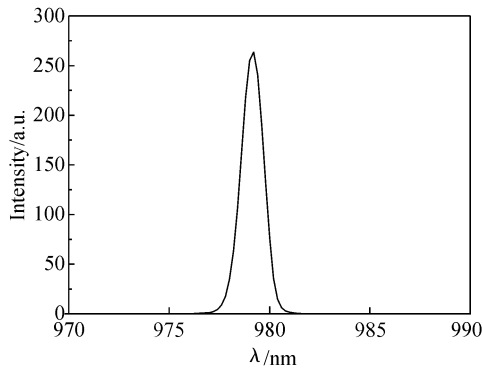


图 2 19 个单元的垂直腔面发射激光器阵列的激光光谱图(测试电流为直流 2A,大约 8 倍于阈值)

Fig.2 Lasing spectrum of the 19-elements VCSEL array (the drive current is 2A DC, 8 times the threshold)

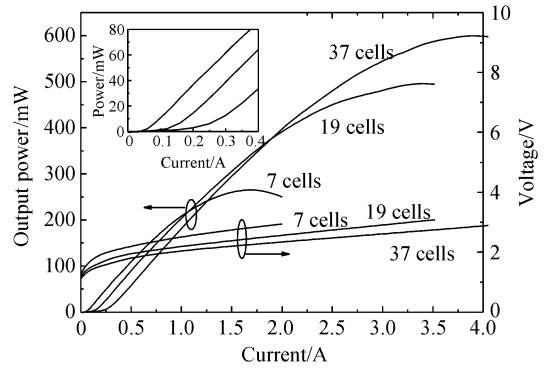


图 3 垂直腔面发射激光器阵列的 $I-V$ 及 $P-I$ 特性

Fig.3 $I-V$ and $P-I$ characteristics of the VCSEL arrays

3 种阵列典型的室温连续工作的 $I-V$ 和 $P-I$ 特性如图 3 所示,内插图为阈值附近 $P-I$ 特性.由 $I-V$ 特性可以看出,3 种阵列的微分电阻分别为 $0.63, 0.35$ 和 0.28Ω ;而由内插图可以看出,它们的阈值分别约为 $50, 125$ 和 250mA .这是由于阵列单元都是并联驱动的,并联的单元越多,总的并联电阻就越小,而使阵列单元都到达阈值的总驱动电流就越大.另外,阈值电流的比例为 $1:2.5:5$,而单元个数比为 $1:2.71:5.28$,两个比例基本一致,因此,我们可以得出结论,所制作阵列的单元均匀性较好,驱动电流是均匀注入各单元的,阵列的阈值电流约等于单元的阈值电流乘以单元个数.由器件的 $P-I$ 特性可以看出,3 种阵列的最高输出功率分别为 $0.26, 0.5$ 和 0.6W ,可见,最高输出功率与单元个数并非正比关系,文献[6]提出的阵列单元热串扰模型及其公式(8)可以说明这个问题,即单元个数越多,每个单元就受到越多的其他单元的热串扰,这从图 4 所示的 3 种器件的转换效率也可以看出,随着单元个数的增多,器件的功率转换效率是略有下降的.

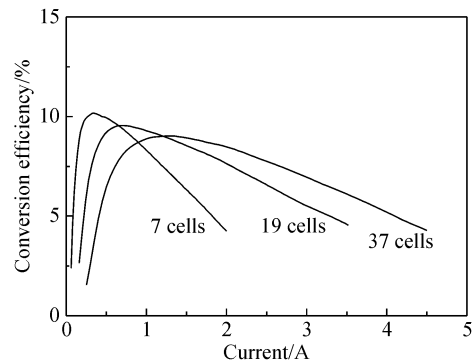


图 4 垂直腔面发射激光器阵列的功率转换效率曲线

Fig.4 Conversion efficiency curves of the VCSEL arrays

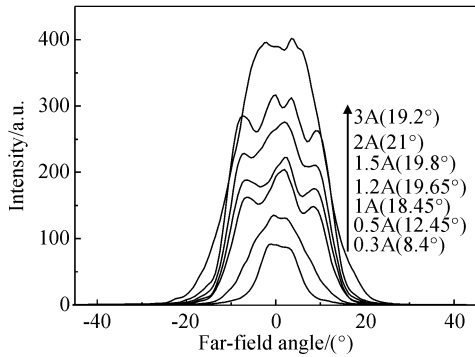


图 5 19 个单元的垂直腔面发射激光器阵列的远场发散角
Fig.5 Far-field angle of the 19-elements VCSEL array

图 5 为含 19 个单元的列阵在注入不同连续电流下的发散角。可以看出,随着电流注入的变化,远场发散角也是逐渐变化的,最小为 8.4° (0.3A 时),最大为 21° (2A 时),而且光场中央的亮度与周围相比也有强弱变化。这是由于随着电流注入的增大,一方面所激发的光场横向模式数增多,另一方面会形成“热透镜”现象,器件最后的远场特性应该主要由这两种效应共同决定^[6]。

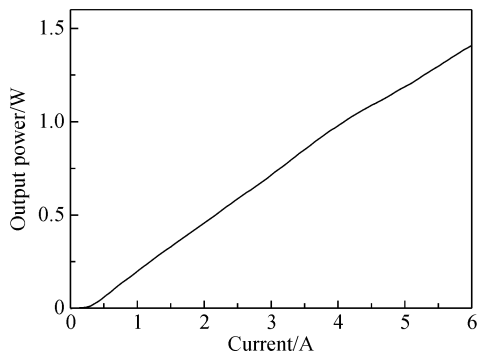


图 6 脉冲测试下(电流 6A,脉宽 $30\mu\text{s}$,重复频率 100Hz)37 个单元的垂直腔面发射激光器阵列(单元台面直径为 $70\mu\text{m}$,氧化孔径为 $30\mu\text{m}$,相邻单元间隔为 $100\mu\text{m}$)的 $P-I$ 曲线
Fig.6 $P-I$ curve of the 37-elements (the mesa diameter of the element is $70\mu\text{m}$, the oxide aperture is $30\mu\text{m}$, and the center-to-center spacing of neighboring elements is $100\mu\text{m}$) array under pulse current (6A pulse current, $30\mu\text{s}$ at 100Hz)

图 6 为含 37 个单元的列阵在脉宽 $30\mu\text{s}$,重复频率 100Hz,占空比 0.3% 的脉冲电流激发下所得的 $P-I$ 曲线图,在脉冲电流 6A 下,器件的功率达到 1.4W。

4 结论

成功研制了高密度排列大功率 VCSEL 列阵,这在国内是首次报道。制作了含 7,19,37 个单元的列阵,室温连续输出最大功率分别对应为 0.26,0.5 和 0.6W,器件的阈值较低且发散角较小。其中含 37 个单元的列阵在 6A 脉冲电流(脉宽 $30\mu\text{s}$,重复频率 100Hz)激发下,输出功率达到 1.4W。但是可以看到,器件的功率转换效率仍然较低,均在 10% 左右。我们认为可以从如下几个方面进行改进以提高器件性能:(1)优化材料生长,特别是为大功率进行优化;(2)烧结时采用 AuSn 焊料和金刚石散热片,并对列阵烧结工艺进行优化,比如烧结时对管芯施加压力;(3)对单元的尺寸和间距进行优化,从而进一步增加单元个数,提高输出功率;(4)使用水冷热沉有效带走器件产生的热量。通过上述方面的优化和改进,单片 VCSEL 列阵器件的连续输出功率有望达到 2W 以上,同时功率转换效率达到 20% 以上。

参考文献

- [1] Iga K, Koyama F, Kinoshita S. Surface emitting semiconductor lasers. IEEE J Quantum Electron, 1988, 24(9): 1845
- [2] Sun Yanfang, Jin Zhenhua, Ning Yongqiang, et al. Fabrication and experimental characterization of high power bottom-emitting VCSELs. Optics and Precision Engineering, 2004, 12(5): 49 (in Chinese) [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. 光学精密工程, 2004, 12(5): 449]
- [3] Asaro D, Scurin L A, Wynn J F, et al. High-power, high-efficiency VCSELs pursue the goal. Photonics Spectra, 2005, 39(2): 62
- [4] Francis D, Chen H L, Chang-Hasnain C, et al. Monolithic 2D-VCSEL array with $>2\text{W}$ CW and $>5\text{W}$ pulsed output power. Electron Lett, 1998, 34(22): 2132
- [5] Miller M, Grabherr M, Ebeling K J, et al. High-power VCSEL arrays for emission in the Watt regime at room temperature. IEEE Photonics Technol Lett, 2001, 13(3): 173
- [6] Grabherr M, Miller M, Jager R, et al. High-power VCSEL's: single device and densely packed 2-D-arrays. IEEE J Sel Topics Quantum Electron, 1999, 5(3): 495

Densely Packed High Power VCSEL Arrays*

Wang Qing[†], Cao Yulian, He Guorong, Wei Xin, Qu Hongwei,
Song Guofeng, Ma Wenquan, and Chen Lianghui

(*Nano-Optoelectronics Laboratory, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China*)

Abstract: The fabrication process of 980nm, densely packed, high power, VCSEL 2D-arrays is reported for the first time in mainland China. The individual elements of the arrays are arranged in a honeycomb-like layout, the mesa diameter of the element is $70\mu\text{m}$, the oxide aperture is $30\mu\text{m}$, and the center-to-center spacing of neighboring elements is $100\mu\text{m}$. VCSEL arrays containing 7, 19, and 37 elements are fabricated, and the characteristics of the threshold current and the far-field angle are discussed. Given CW operation at room temperature, these three kinds of arrays have 0.26, 0.5, and 0.6W output power, respectively. With a 6A pulse current ($30\mu\text{s}$ at 100Hz), the 37-elements array's output power reaches 1.4W.

Key words: VCSEL; array; threshold current; far-field angle; high power

PACC: 4255P; 4260B **EEACC:** 4320J

Article ID: 0253-4177(2007)11-1803-04

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 60636030)

[†] Corresponding author. Email: wangqing@mail.semi.ac.cn

Received 9 April 2007, revised manuscript received 16 May 2007