

文章编号: 1000-7032(2011)08-0834-05

大功率垂直腔面发射激光器的相干性测量与分析

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 激发态物理重点实验室 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;
2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

摘要: 通过有机化学气相沉积(MOCVD)技术在 n 型 GaAs 衬底上生长制作了发射波长为 850 nm 的 VCSELs 4 × 4 列阵器件, 介绍了 VCSELs 的制作工艺流程。对器件进行了相干性测量, 计算了干涉条纹可见度, 分析了影响干涉条纹可见度的因素。

关键词: 垂直腔面发射激光器; 列阵; 相干性

中图分类号: TN248.2

PACS: 42.55.Px

PACC: 4255P

文献标识码: A

DOI: 10.3788/fgxb20113208.0834

1 引 言

20 世纪 80 年代初, 东京工业大学的伊贺健一提出了面发射激光器的概念, 自此以后的 30 余年里, 垂直腔面发射激光器(Vertical-cavity surface-emitting lasers, VCSELs) 以其独特的性能引起了大量科研工作者的兴趣^[1-3]。与此同时, 随着薄膜生长等半导体工艺技术的不断发展和完善, VCSELs 也飞跃式地向前发展。目前 VCSELs 已经成功应用于光通讯、光互连、计算机网络、激光打印和显示等领域^[4-7]。但是, 关于大功率 VCSELs 相干特性的应用却一直没有引起人们的重视。大功率 VCSELs 相干性可以应用于探测、全息技术、激光雷达和激光光纤通讯等领域, 其中以激光雷达的应用最为广泛。激光雷达的作用是精确测量目标位置、运动状态和形状, 探测、识别、分辨和跟踪目标, 而半导体激光器以其体积小、重量轻和便于携带等优点而越来越多地被用做激光雷达的光源, 尤其是 VCSELs 列阵可以作为光源应用于相控阵激光雷达当中。相控阵激光雷达具有大空域、多目标、大功率、完善的自适应能力以及较强的抗干扰能力等优势, 是未来雷达发展的一个重要方向。

本文制作了发射波长为 850 nm 的 VCSELs 4 × 4 列阵器件, 对器件进行了相干性测量, 计算了干涉条纹可见度, 分析了影响干涉条纹可见度的因素。

2 器件制作和测试系统

本文所用 VCSELs 为 850 nm 顶发射 4 × 4 列阵, 芯片是通过金属有机化学气相沉积(MOCVD)技术在 n 型 GaAs 衬底上生长而成。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 Al_{0.9}-Ga_{0.1}As/Al_{0.12}Ga_{0.88}As 组成。有源区由 3 个量子阱组成, 垒厚 8 nm, 材料为 Al_{0.3}Ga_{0.7}As; 阱厚 6 nm, 材料为 GaAs。C 掺杂的 p 型 DBR 由 20 对 Al_{0.9}Ga_{0.1}As/Al_{0.12}Ga_{0.88}As 组成, 用于输出激光束。在有源层和顶部的 p 型 DBR 之间有一层 30 nm 厚的 Al_{0.98}Ga_{0.02}As 层, 可以被氧化成 Al_xO_y, 从而实现了对光和电流的限制。图 1 为 850 nm 顶发射 VCSEL 芯片结构的截面示意图。

首先对芯片 n 面衬底进行减薄, 一般将衬底从原来的 650 ~ 700 μm 减薄至 300 ~ 350 μm。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膜。通过化学刻蚀的方法形成非闭合环形凹槽列

收稿日期: 2011-04-08; 修订日期: 2011-05-03

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(90923037)资助项目

作者简介: 史晶晶(1982-), 女, 黑龙江七台河人, 主要从事垂直腔面发射激光器的研究。

E-mail: shijj_19820530@yahoo.com.cn, Tel: (0431) 81676335

*: 通讯联系人; E-mail: hx5252@sohu.com

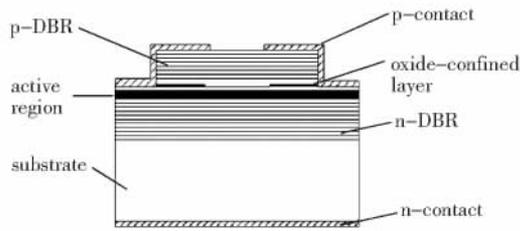


图 1 850 nm 顶发射 VCSEL 芯片结构截面示意图

Fig.1 Schematic cross section of a 850 nm top-emitting VCSEL

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^[8-12]。氧化之后, 在芯片表面覆盖一层 SiO₂ 绝缘钝化层, 该层不可过薄也不可过厚, 太薄则容易出现针孔, 导致漏电流的产生; 太厚则给器件带来过多应力, 易造成器件损伤。套刻圆形电极, 腐蚀掉电极内的 SiO₂, 形成电流注入窗口。套刻的圆形电极要略小于内环的台面, 这样做是为了确保内环台面的侧壁有 SiO₂ 绝缘钝化层的保护, 以免电流从内环台面侧壁直接流入衬底。在 p 面上生长 Ti-Au 层作为 p 型电极。对芯片 n 面的衬底再次进行减薄, 一般要将衬底减至 150 ~ 180 μm。在芯

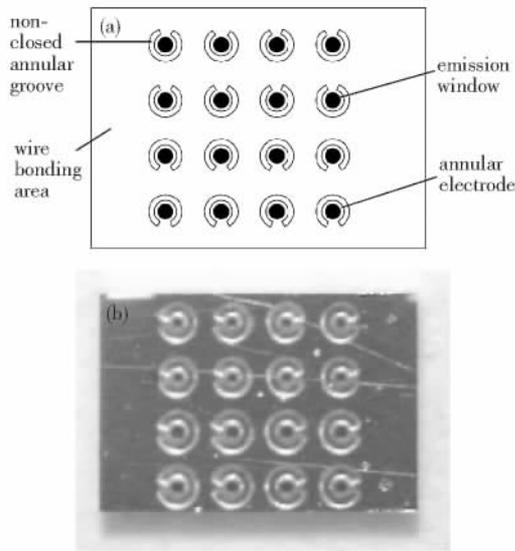


图 2 850 nm 顶发射 VCSEL 4 × 4 列阵 (a) 器件结构示意图; (b) 器件照片。

Fig.2 850 nm top-emitting 4 × 4 VCSEL array (a) schematic of device structure; (b) photo of device.

片 p 面套刻出光窗口。腐蚀掉窗口处的 Ti-Au 形成出光窗口。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, 若反应过快则不易控制反应时间, 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 Ti: V(HF): V(HNO₃): V(H₂O) = 1: 2: 69; 腐蚀金属 Au: I₂: KI: H₂O = 1 g: 4 g: 8 mL。在衬底上生长 Au-Ge-Ni 作为 n 型电极。最后, 进行合金、解理、初测、压焊和封装^[13-15]。图 2 为 850 nm 顶发射 VCSELs 器件的结构示意图和照片。

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; 而另一方面, 发光单元间距的增大又减小了器件的输出功率密度。基于以上考虑, 我们将 VCSELs 列阵器件的台面设计为 80 μm, 发光单元间距为 200 μm。

3 测量结果及分析

对 850 nm 顶发射 VCSELs 4 × 4 列阵的输出特性进行测量。图 3 分别为器件在连续和脉冲注

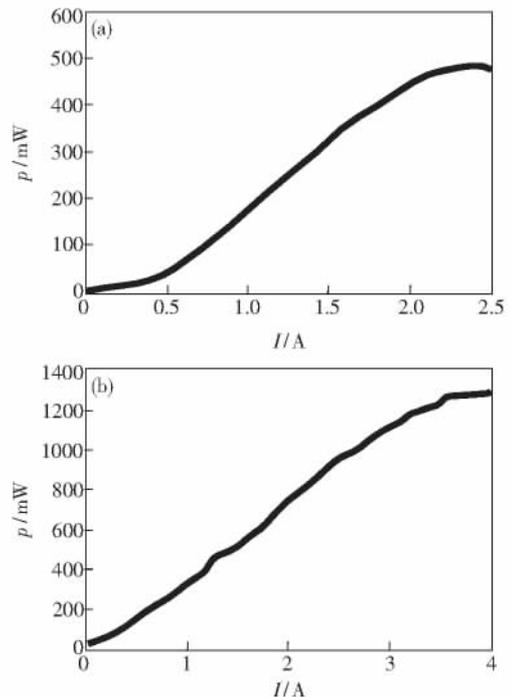


图 3 850 nm VCSELs 列阵的功率-电流曲线, (a) 连续注入电流; (b) 脉冲注入电流。

Fig.3 The current-power curve of 850 nm VCSELs array, (a) CW current injection; (b) pulse current injection.

入电流下的功率曲线。从图中可以看出,在连续注入电流条件下,器件阈值电流为 0.4 A,峰值输出功率为 480 mW;在脉宽为 50 μ s、重复频率为 100 Hz 的脉冲注入电流条件下,器件阈值电流为 0.7 A,最大输出功率为 1 279 mW。

图 4 为 850 nm 顶发射 VCSELs 4×4 列阵器件的发射光谱图。器件发射峰值波长为 848.8 nm,发射光谱半峰全宽为 2.3 nm。

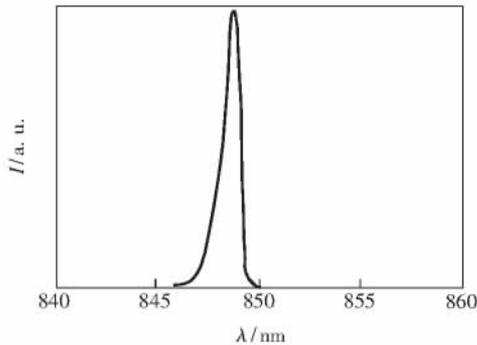


图 4 850 nm 顶发射 VCSELs 4×4 列阵器件的发射光谱图

Fig. 4 Emission spectra of 850 nm top-emitting 4×4 VCSELs arrays

令 850 nm 顶发射 VCSELs 器件所发出的激光经过双狭缝,缝宽 300 μ m,缝间距 300 μ m。由于 VCSELs 受激辐射所发出的光频率一致,相位一致,因此,所发出的激光具有相干性,通过狭缝后在屏上可呈现明暗相间的条纹。图 5 为实验装置示意图。

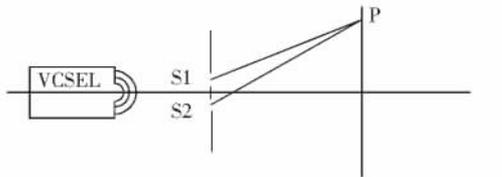


图 5 双缝测量相干性示意图

Fig. 5 Schematic of coherence measurement by double-slit

在连续电流注入条件下,对器件进行相干性测量,用 CCD 相机将屏上的明暗条纹进行拍摄[图 6(a)],经过 Matlab 软件处理,得到图 6(b)所示的相干条纹二维图。

对于普通光源来讲,原子发光过程都是自发辐射过程,各个原子的辐射都是自发、独立进行的,因而各个原子发出的光子在频率、发射方向和初相位上都不一定相同,所以,在普通光源的不同

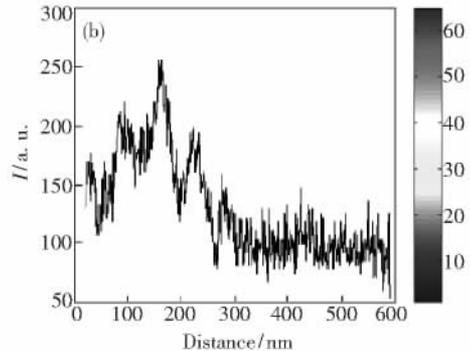
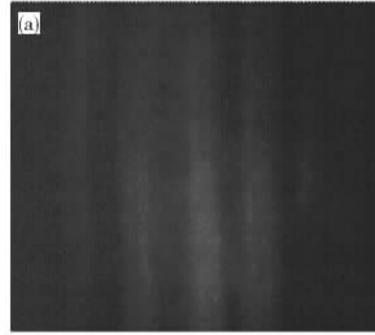


图 6 器件的相干性,(a) 相干条纹照片;(b) 二维相干条纹图。

Fig. 6 The coherence of device,(a) photo of coherent stripes;(b) two-dimensional curve of coherent stripes.

位置发出来的光是不相干的。而激光的发光过程是受激辐射,它的波长分布范围很窄,其振幅、频率和相位都高度一致,因此,激光是具有相干性的。

为了描述干涉条纹的明暗对比,应用可见度的概念,定义为:

$$V = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}, \quad (1)$$

当 $I_{\min} = 0$ 时,即暗条纹全黑时, $V = 1$,条纹的反差最大,条纹最清晰;当 $I_{\max} \approx I_{\min}$ 时, $V = 0$,条纹模糊不清,甚至不可辨认。

当注入电流小于阈值电流时,观察不到干涉条纹,这是由于阈值条件以下的发光过程为自发辐射,所发出的光为荧光,不具有相干性。当注入电流超过阈值电流时(图 6),由式(1)计算得到干涉条纹可见度 $V = 0.25$ 。

所使用的激光源其实并不是单一频率的理想光源,它包含着一定的波长范围,这会影响干涉条纹的可见度。由于在波长范围内的每一波长的光均形成各自的一组干涉条纹,而且各组条纹除零级以外,互相间均有一定的位移,所以各组条纹非相干叠加的结果导致了条纹的可见度下降。

干涉条纹亮度最大值位置的范围可以表示为:

$$\Delta y = j \frac{r_0}{d} \Delta \lambda, \quad (2)$$

式中 Δy 为明条纹宽度, d 为窄缝之间的距离, r_0 为窄缝到屏的距离。本文中 $d = 300 \mu\text{m}$, $r_0 = 1 \text{ cm}$, $\Delta \lambda = 2.3 \text{ nm}$ 。那么由式(2)可以得出,第一级亮条纹的宽度为 77 nm ,比图6(b)所示的亮条纹略窄。这是由于除光谱宽度之外,光源的线度等因素也影响着干涉条纹的宽度和可见度。在 Δy 内,充满着第 j 级、波长在 λ 和 $\Delta \lambda$ 之间的各种波长的明条纹。由式(2)可知,随着干涉级的提高,同一级干涉条纹的宽度增大,干涉条纹的可见度相应降低,当波长为 $(\lambda + \Delta \lambda)$ 的第 j 级与波长为 λ 的第 $(j+1)$ 级条纹重合时,条纹的可见度降为零,无法观察到条纹。

当 $(\lambda + \Delta \lambda)$ 的第 j 级与波长为 λ 的第 $(j+1)$ 级条纹重合时,即

$$(j+1)\lambda = j(\lambda + \Delta \lambda), \quad (3)$$

由上式可以得到干涉条纹的可见度降为零时的干涉级数为

$$j = \frac{\lambda}{\Delta \lambda}. \quad (4)$$

4 结 论

目前,大功率 VCSELs 相干性的应用尚非常少见。本文分析了大功率 VCSELs 相干性的应用前景,制做了 850 nm 顶发射 VCSEL 4×4 列阵器件,详细介绍了整个制作工艺流程。对 4×4 列阵器件进行了相干性的测量,计算了干涉条纹的可见度,并分析了影响干涉条纹可见度的因素。

参 考 文 献:

- [1] Liao J, Zeng J, Deng S, et al. Packaging of optoelectronic and RF components with shared elements for dual-mode wire-less communications [J]. *IEEE Electronics Lett.*, 2009, **45**(8): 411-412.
- [2] Bissessur H K, Koyama F. Modeling of oxide-confined vertical-cavity surface-emitting lasers [J]. *IEEE J. Selected Topics in Quantum Electronics*, 1997, **3**(2): 344-352.
- [3] Liang Xuemei, Lv Jinkai, Cheng Liwen, et al. Structural design of vertical-external-cavity surface-emitting semiconductor laser with 920 nm [J]. *Chin. J. Lumin.* (发光学报), 2010, **31**(1): 79-85.
- [4] Safaisini R, Joseph J R, Dang G, et al. Scalable high-power, high-speed CW VCSEL arrays [J]. *IEEE Electronics Lett.*, 2009, **45**(8): 414-415.
- [5] Liu Guangyu, Ning Yongqiang, Zhang Lisen, et al. Two-dimension photonic crystal complete bandgap [J]. *Chin. J. Lumin.* (发光学报), 2011, **32**(2): 169-173 (in Chinese).
- [6] Cheng Liwen, Liang Xuemei, Qin Li, et al. Theoretical analysis of key parameters of 980 nm optically pumped semiconductor vertical external cavity surface emitting laser [J]. *Chin. J. Lumin.* (发光学报), 2008, **29**(4): 713-717 (in Chinese).
- [7] Balakrishnan G, Huang S H, Khoshakhlagh A, et al. Room-temperature optically-pumped GaSb quantum well based VCSEL monolithically grown on Si(100) substrate [J]. *IEEE Electronics Lett.*, 2006, **42**(6): 350-352.
- [8] Amann M C, Hofmann W. InP-based long-wavelength VCSELs and VCSEL arrays [J]. *IEEE J. Selected Topics in Quantum Electronics*, 2009, **15**(3): 861-868.
- [9] Safaisini R, Joseph J R, Lear K. Scalable high-CW-power high-speed 980 nm VCSEL arrays [J]. *IEEE J. Quantum Electronics*, 2010, **46**(11): 1590-1596.
- [10] Liu Wenli, Zhong Jingchang, Yan Changling. A novel vertical-cavity surface-emitting laser array [J]. *Chin. J. Lumin.* (发光学报), 2006, **27**(4): 519-525 (in Chinese).
- [11] Liu Yun, Liao Xinheng, Qin Li, et al. Oxygen-free copper microchannel heat sink of high power semiconductor laser [J]. *Chin. J. Lumin.* (发光学报), 2005, **26**(1): 109-114 (in Chinese).
- [12] Hiramatsu S, Kinoshita M, Ishitsuka T, et al. Implementation of active interposers for extremely high-definition display [J]. *IEEE Journal of Lightwave Technology*, 2006, **24**(2): 976-981.
- [13] Ma Qiang, Tian Zhenhua, Wang Zhenfu, et al. A theoretical model of high power vcsel based on the thermal-offset-current [J]. *Chin. J. Lumin.* (发光学报), 2009, **30**(4): 463-466 (in Chinese).

- [14] 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 Lett.* , 2004 , **40**(23) : 1508-1509.
- [15] Feng Guangzhi , Gu Yuanyuan , Shan Xiaonan , *et al.* 808 nm High power diode laser stack with polarization coupling [J]. *Chin. J. Lumin.* (发光学报) , 2008 , **29**(4) : 695-700 (in Chinese) .

Coherent Measurement and Analysis of Vertical-cavity Surface-emitting Laser

SHI Jing-jing^{1,2} , QIN Li¹ , NING Yong-qiang¹ , LIU Yun¹ ,
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 School of Chinese Academy of Sciences , Beijing 100039 , China)

Abstract: The devices of top-emitting 4×4 VCSELs array with the emission wavelength of 850 nm was produced , and the production process of VCSELs were described. Coherence of the device were measured , the visibility of interference figure was calculated , and the effect factor of interference fringe visibility was also analyzed.

Key words: vertical-cavity surface-emitting laser; array; coherence

CLC number: TN248.2

PACS: 42.55.Px

PACC: 4255P

Document code: A

DOI: 10.3788/fgxb20113208.0834