

# 纳米孔径垂直腔面发射激光器的制备及特性\*

高建霞<sup>†</sup> 宋国峰 甘巧强 徐 云 郭宝山 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:** 在 850nm 波长垂直腔面发射激光器的基础上制备了纳米孔径垂直腔面发射激光器. 当小孔尺寸为 400nm × 400nm 时, 在 25mA 驱动电流下, 其最大输出光功率达到了 0.3mW, 功率密度约为 2mW/ $\mu\text{m}^2$ . 文中介绍了纳米孔径垂直腔面发射激光器的制备工艺, 并对它的光谱特性和寿命特性进行了分析.

**关键词:** 近场光学; 纳米孔径垂直腔面发射激光器; 输出光功率; 光学特性

**PACC:** 4260D; 4255P

**中图分类号:** TN248.4

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0253-4177(2007)02-0265-04

## 1 引言

传统的光存储技术由于受到光学衍射的限制, 能达到的存储密度有限, 因而利用近场光学实现超高密度光学存储越来越受到了人们的关注<sup>[1,2]</sup>. 它的基本思想是, 通过亚波长尺寸的光学头和亚波长尺寸的距离控制, 获得近场信息, 实现亚波长尺寸的光点记录, 从而实现高密度光学存储. 1999 年, Partovi 等人<sup>[3]</sup>首次利用 980nm 激光器制备出了第一个微小孔激光光源, 提出了使用微小孔激光器(very-small-aperture lasers, VSALs)作为近场光源进行近场光存储的设想, 并证明在小孔直径相当的情况下, VSAL 的输出光功率比锥形镀膜光纤探针提高了  $10^4$  倍, 取得了探针型近场存储的突破性进展. 同年, Shinada 等人<sup>[4]</sup>首次利用垂直腔面发射激光器(VCSEL)制备出了微小孔激光器. 这项技术和边发射激光器相比有更好的前景, 它具有更小的尺寸, 更利于实现集成. 另外, 由于垂直腔面发射激光器具有对称光输出模式, 从而使小孔的制备更加容易.

对于光学存储, 应该达到的功率密度为  $10\text{mW}/\mu\text{m}^2$ , 这个数字和目前我们所能得到的最大功率密度还有一定差距. 为了解决这一问题, Goto<sup>[5]</sup>提出了基于垂直腔面发射激光器阵列的万亿字节光学记忆系统, 利用在面发射激光器芯片中形成微小金属孔以生成高效率的近场光. 另一方面, 随着表面等离子体亚波长光学研究的升温, 提出了利用金属表面等离子体效应来提高透射强度<sup>[6,7]</sup>的方法.

我们针对基于边发射的微小孔激光器开展了一系列研究, 并取得了一定的进展<sup>[8,9]</sup>. 同时由于 VC-

SEL 相对于边发射激光器具有一定的优越性, 从而展开了对纳米孔径垂直腔面发射激光器(nano-aperture vertical-cavity surface-emitting laser, NA-VCSEL)的研究. 本文详细介绍了 NA-VCSEL 的制备工艺, 并研究分析了它的光谱特性和寿命特性.

## 2 NA-VCSEL 的制备

NA-VCSEL 是在普通 850nm 波长 VCSEL 的基础上制备得到的. 图 1 为它的结构示意图. 其具体制备工艺如下:

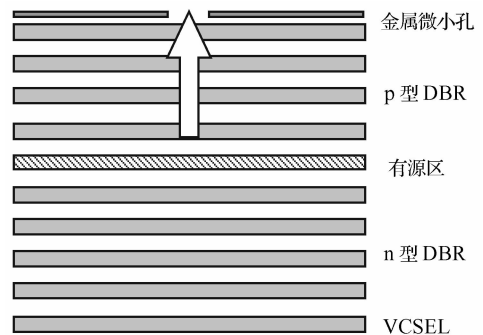


图 1 NA-VCSEL 的结构示意图

Fig.1 Schematic structure of a NA-VCSEL

(1) 淀积增透膜: 在 850nm 波长 VCSEL 的出光腔面上, 用电子回旋共振等离子体化学气相沉积法淀积一层  $\text{SiO}_2$  和  $\text{SiN}_x$  增透膜. 它具有以下两方面的作用: 一是在下一步镀金时避免金和出光腔面直接接触, 从而起到保护腔面的作用; 二是作为相位

\* 中国科学院知识创新工程和国家高技术研究发展计划(批准号:2002AA313060)资助项目

<sup>†</sup> 通信作者. Email: jxgao@red.semi.ac.cn

2006-08-16 收到, 2006-08-31 定稿

匹配层,可以使微小孔器件满足等离子共振的条件,提高出光功率<sup>[7]</sup>.

(2)镀金膜:在完成第一步的基础上用磁控溅射法镀一层材料为 Ti/Au 的金属膜.这里 Ti 的作用是提高表面的粘附性,使金层不易剥落;Au 的主要作用是阻挡住激光器出光腔面正常的输出光,因为 Au 在 850nm 波长下具有很高的反射率,可以达到 98%左右.

(3)制备小孔:在 Au 膜上通过聚焦离子束(focus ion beam, FIB)刻蚀技术开一个亚波长尺寸的小孔.其目的是将光限制在低损失微小谐振腔中,使光通过微小开口出射,这样可能生成高效率的近场光,从而超越衍射极限.这里 FIB 标称离子束分辨率为 7nm 左右.图 2 为微小孔的 SEM 形貌图(方孔尺寸:400nm×400nm).

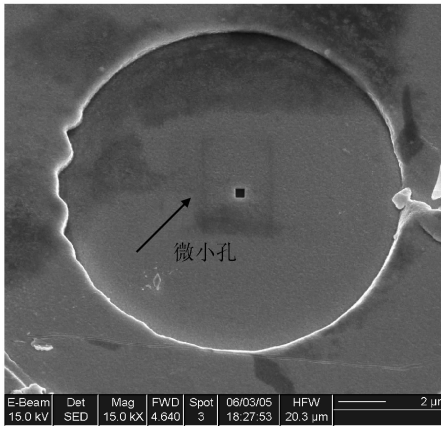


图 2 微小方孔(400nm×400nm)的 SEM 形貌图  
Fig. 2 SEM graph of the square microaperture (400nm×400nm)

### 3 NA-VCSEL 性能测试结果与分析

#### 3.1 P-I-V 特性分析

微小孔器件作为一种近场光学器件,近场特性是评价其性能的关键参数.但是目前还没有较好的方法对它的近场功率进行探测分析,因此在实验中只能通过探测远场功率的办法来判断小孔器件性能的好坏.根据文献<sup>[10,11]</sup>,一般如果远场光强高,则近场光强通常也比较高.图 3 为 NA-VCSEL 远场功率测试系统的示意图,由于波长在 850nm 左右,所以使用的是 Si 探测器,面积约为 10mm×10mm.为了减少测量过程中的功率损失,探测器和样品表面的距离越近越好,这里由于实验条件的限制使其保持在 1cm 左右.图 4 为测量得到的微小孔器件(方孔尺寸:400nm×400nm)的 L-I-V 特性曲线.出

光功率在 25mA 驱动电流下达到 0.3mW,出光功率密度约为 2mW/μm<sup>2</sup>.

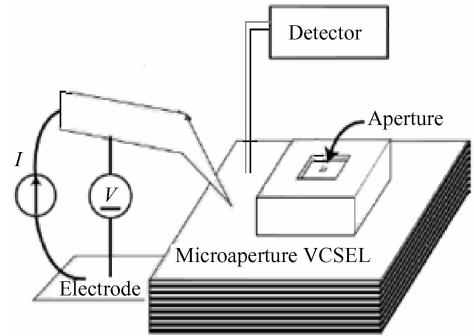


图 3 NA-VCSEL 远场功率测试系统示意图  
Fig.3 NA-VCSEL far-field power measurement set-up

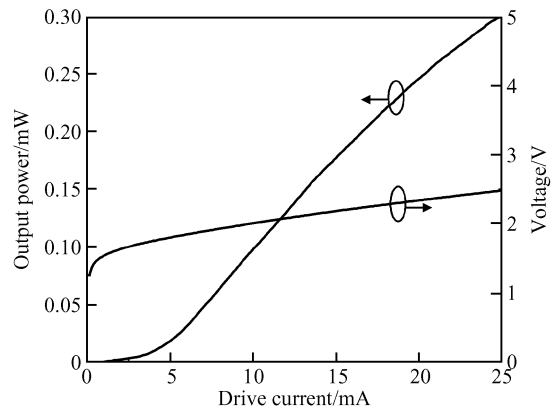


图 4 NA-VCSEL 的 L-I-V 特性曲线 方孔尺寸:400nm×400nm  
Fig. 4 L-I-V characteristics of the NA-VCSEL Square aperture:400nm×400nm

#### 3.2 光谱特性

图 5 为普通 VCSEL 和 NA-VCSEL 光谱的对

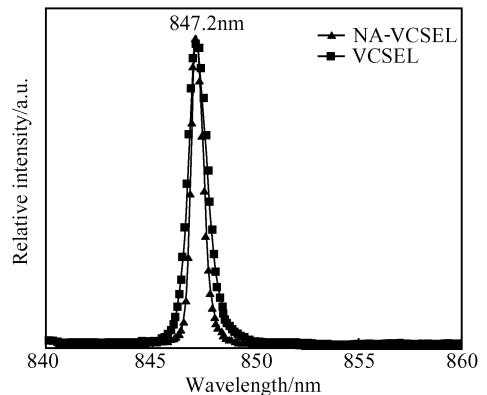


图 5 普通 VCSEL 和 NA-VCSEL 的光谱图  
Fig.5 Spectra of common VCSEL and NA-VCSEL

比图. 可以看到两者的谱线位置基本没有变化, 都为 847.2nm. 普通 VCSEL 的半高全宽为 1nm, 而微小孔器件的半高宽稍微变窄.

### 3.3 寿命特性

NA-VCSEL 在常规激光器的基础上加镀了一层金属膜, 致使退化现象更加明显. 由于它本身的出光功率很小, 采用在室温 30mA 恒定驱动电流下进行寿命测试, 即分析它在恒流下工作时功率变化情况, 如图 6 所示. 可以看到, 老化之前 NA-VCSEL 的最大出光功率为 0.50mW; 老化初始阶段, 功率呈现缓慢的下降趋势; 随着时间延长, 大概在 240h 时, 功率出现了明显的降低; 当功率下降到 0.35mW 后, 又达到了一个相对稳定的阶段. 目前商用半导体激光器的寿命在 20~60℃ 条件下通常能连续工作  $10^4$  h 以上, 可见 NA-VCSEL 的寿命特性明显不如普通激光器. 这是由于制备过程中, 出光腔面镀的金属膜会在器件工作时发生强反射, 导致 NA-VCSEL 内部光子密度升高, 导带底和价带顶的载流子密度增加. 在外部电注入相同的情况下, 内部载流子密度会比普通激光器高, 从而导致寿命降低. NA-VCSEL 寿命短的问题是它在实际应用中的一大障碍, 因此在下一步实用化研究中, 应当注意考虑如何降低器件内部的光能流密度以提高其寿命和稳定性.

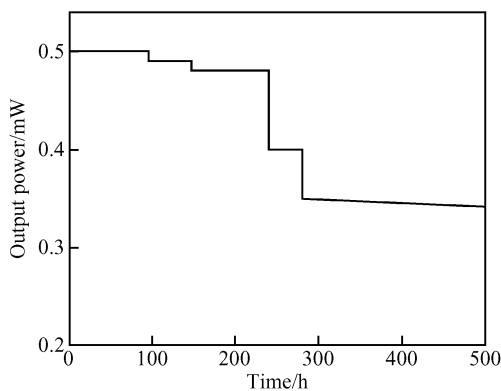


图6 微小孔器件在室温 30mA 驱动电流下的寿命曲线  
Fig.6 Lifetime test curve of the NA-VCSEL with a driving current of 30mA at room temperature

## 4 结论

在普通 850nm 波长 VCSEL 基础上制备了 NA-VCSEL. 当小孔尺寸为  $400\text{nm} \times 400\text{nm}$  时, 25mA 驱动电流下最大输出光功率达到了 0.3mW, 功率密度约为  $2\text{mW}/\mu\text{m}^2$ . 还分析了 NA-VCSEL 的光谱特性和寿命特性. 在今后的工作中将进一步优化微小孔器件的结构, 期望利用表面等离子体效应来提高输出光功率<sup>[12]</sup>.

**致谢** 感谢北京大学徐军老师在器件制备过程中提供的帮助.

### 参考文献

- [1] Ohtsu M. Near-field nano/atom optics & technology. Tokyo: Springer-Verlag, 1998
- [2] Betzig E, Trautman J K, Wolfe R, et al. Near-field magneto-optics and high density data storage. Appl Phys Lett, 1992, 61:142
- [3] Partovi A, Peale D, Wuttig M, et al. High-power laser light source for near-field optics and its application to high-density optical data storage. Appl Phys Lett, 1999, 75:1515
- [4] Shinada S, Koyama F, Nishiyama N, et al. Fabricated of micro-aperture surface emitting laser for near field optical data storage. Jpn J Appl Phys, 1999, 38:1327
- [5] Goto K. Proposal of ultrahigh density optical disk system using a vertical cavity surface emitting laser array. Jpn J Appl Phys, 1998, 37:2274
- [6] Shinada S, Hashizume J, Koyama F. Surface plasmon resonance on microaperture vertical-cavity surface-emitting laser with metal grating. Appl Phys Lett, 2003, 83:836
- [7] Hashizume J, Koyama F. Plasmon-enhancement of optical near-field of metal nanoaperture surface-emitting laser. Appl Phys Lett, 2004, 84:3226
- [8] Gan Qiaoqiang, Song Guofeng, Yang Guohua, et al. Near-field scanning optical microscopy with an active probe. Appl Phys Lett, 2006, 88:121111
- [9] Gan Q, Song G, Xu Y, et al. Performance analysis of very-small-aperture lasers. Opt Lett, 2005, 30:1470
- [10] Chen Fang. A study of very-small-aperture lasers for near-field recording. PhD Dissertation, Carnegie Mellon University, 2003
- [11] Shi Xiaolei. Single subwavelength aperture for near field applications. PhD Dissertation, Stanford University, 2003
- [12] Raether H. Surface plasmons on smooth and rough surfaces and gratings. Berlin: Springer Tracts in Modern Physics, 1998

## Fabrication and Characteristics of Nano-Aperture Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser\*

Gao Jianxia<sup>†</sup>, Song Guofeng, Gan Qiaoqiang, Xu Yun, Guo Baoshan, and Chen Lianghui

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

**Abstract:** Nano-aperture vertical-cavity surface-emitting lasers were fabricated on common 850nm VCSELs. When the size of the aperture was  $400\text{nm} \times 400\text{nm}$ , the maximum far-field output power reached 0.3mW at a driving current of 25mA, and the power density was about  $2\text{mW}/\mu\text{m}^2$ . The fabrication process is introduced here. Spectra and lifetime characteristics of the devices are also analyzed.

**Key words:** near-field optics; nano-aperture VCSEL; output power; optical characteristics

**PACC:** 4260; 4255

**Article ID:** 0253-4177(2007)02-0265-04

---

\* Project supported by the Knowledge Innovation Engineering of the Chinese Academy of Sciences and the National High Technology Research and Development Program of China (No.2002AA313060)

<sup>†</sup> Corresponding author. Email: jxgao@red.semi.ac.cn

Received 16 August 2006, revised manuscript received 31 August 2006

©2007 Chinese Institute of Electronics