

# 表面等离子体调制的纳米孔径垂直 腔面发射激光器<sup>\*</sup>

高建霞<sup>†</sup> 宋国峰 郭宝山 甘巧强 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)

(2007 年 1 月 8 日收到, 2007 年 2 月 27 日收到修改稿)

在普通 850 nm 垂直腔面发射激光器基础上制备了表面等离子体调制的纳米孔径垂直腔面发射激光器. 当小孔直径为 200 nm, 周围光栅的周期为 400 nm 时, 在 15 mA 驱动电流下最大输出光功率达到了 0.3 mW. 介绍了该器件的制备工艺, 并从实验和理论两方面分析了周期性光栅结构对光束的约束作用.

关键词: 表面等离子体, 纳米孔径垂直腔面激光器, 输出光功率, 远场特性

PACC: 4260D, 4255P

## 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, 因而利用近场光存储实现超高密度信息存储已经得到越来越多研究者的重视<sup>[1,2]</sup>. 高质量近场光源是一个重要的研究方向. 1999 年 Partovi<sup>[3]</sup> 等人利用 980 nm 的激光器制备出了第一个微小孔激光光源(VSAL). 同年, Shinada 等人<sup>[4]</sup> 利用垂直腔面发射激光器制备出了微小孔激光器(NA-VCSEL). 虽然测量得到的功率密度还不足以进行数据的存储, 但是这项技术和边发射激光器相比有更好的前景, 具有更小的尺寸. 另外, 对于垂直腔面发射激光器由于它具有对称光输出模式, 从而简化了微小孔的制备工艺.

在应用过程中, 对近场光源的特殊要求就是要实现高功率密度输出. 为了进一步改善和增强纳米光源的性能, 扩大纳米光源技术的应用领域, 在纳米光源的研制中引入了表面等离子体(surface plasmon, SP) 调制技术, 它是增强光学近场的一个有效的方法. SP 是沿导体(通常是金属)表面传播的波, 其本质是光子与导体中的自由电子相互作用而被表面俘获的光波. 在这种相互作用的过程中, 自由电子与光

波产生持续的共振振荡, 表面电荷振子与光波电磁场之间的共振作用形成了 SP. 在光学领域, SP 可以通过亚波长结构用来汇聚和导引光波, 从而起到增强透射的作用. 根据文献[5,6]可知周期性结构的金属微小孔可显著地提高输出功率. 通过对金属表面的纳米结构调制, 人们就能对这种沿表面传播的光波进行控制, 从而衍生出表面等离子体光子能带结构器件、光波导、光开关<sup>[7]</sup>等, 这些器件和技术在光电集成方面具有巨大的潜力. 采用表面等离子体结构调制的纳米光电子器件将为近场光学的研究和应用开辟更广阔的前景.

本文作者针对 VSAL 已经进行了比较深入的研究<sup>[8,9]</sup>. 由于垂直腔面发射激光器具有一些独特的性能, 例如它可以制备成一维或者二维阵列结构, 具有圆形输出光束且发散角较小, 易于单纵模工作等, 因此展开了对 NA-VCSEL 的研究. 本文介绍了具有 SP 调制结构 NA-VCSEL 的制备工艺, 并从实验和理论两方面分析了它的远场特性.

## 2. 器件制备

SP 调制的 NA-VCSEL 是在普通 850 nm 波长 VCSEL 基础上制备得到的. 具体的工艺步骤如下: 首

<sup>\*</sup> 中国科学院知识创新工程和国家高技术研究发展计划(863)批准号 2002AA313060 资助的课题.

<sup>†</sup> E-mail: jxgao@red.semi.ac.cn

先,在 850 nm 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 (ECR plasmon CVD) 淀积一层  $\text{SiO}_2$  和  $\text{SiN}_x$  增透膜. 然后用磁控溅射法镀一层金属膜, 材料为 Ti/Au. 这里 Ti 的作用主要是提高表面的粘附性, 使金层不易剥落; Au 的作用是阻挡住激光器出光腔面正常的输出光. 最后在金属膜上利用聚焦离子束 (FIB) 刻蚀技术刻蚀出一个亚波长尺寸的小孔和周围的光栅. 图 1 为微小孔器件出光腔面的扫描电子显微镜 (SEM) 形貌图, 其中小孔直径 200 nm, 周围光栅的周期 400 nm. 整个刻蚀过程分两步完成, 第一步先刻蚀周围的周期性环状结构, 通过对刻蚀时间和束流大小的控制, 可以大致调整刻蚀的深度. 它的深度与调制作用相关, 但要小于金属层的厚度, 否则光将从光栅处透射, 无法产生表面等离子体效应, 也就不能起到透射增强的作用. 第二步在光栅的中心位置刻蚀直径为 200 nm 的小孔, 刻蚀深度以打透金属层的厚度为宜.

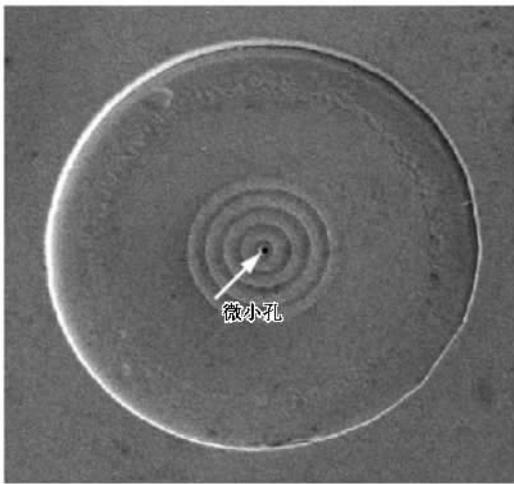


图 1 FIB 打孔后出光腔面的 SEM 形貌图

### 3. 器件性能测试与分析

#### 3.1. $P-I$ 特性

图 2 为 NA-VCSEL 远场功率测试系统的示意图. 实验中采用的普通 VCSEL 器件的远场输出光功率在 25 mA 驱动电流下输出光功率都为 5 mW. 图 3 是测量得到的有无 SP 调制结构时 NA-VCSEL 激光的远场输出功率-驱动电流 ( $P-I$ ) 特性曲线. 可以看到对于微小孔器件, 当小孔周围制备周期性光栅结构后, 出光功率在 15 mA 驱动电流下从 0.18 mW 提

高到了 0.3 mW. 这主要是由于光栅结构可以在金属的表面激发  $\text{SP}^{[10,11]}$ , 它实际上是光与金属导体内的自由电子相互作用, 使光的波矢发生改变, 光波能量被束缚到金属表面传播而不再反射或透射. 通过金属表面纳米结构的调制, 使自由传播光耦合为 SP 波, 就能对这种沿表面传播的光波进行控制, 从而达到近场增透的目的. 另外, SP 激发的条件依赖于周期性结构的参数, 如光栅的周期和深度等.

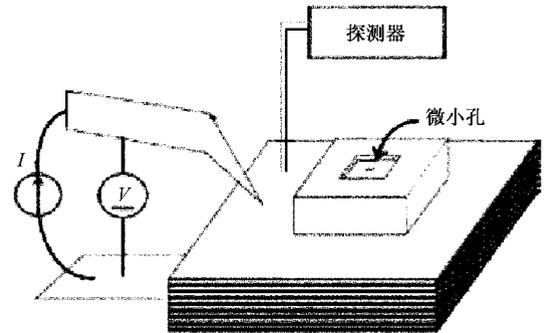


图 2 NA-VCSEL 远场功率测试系统的示意图

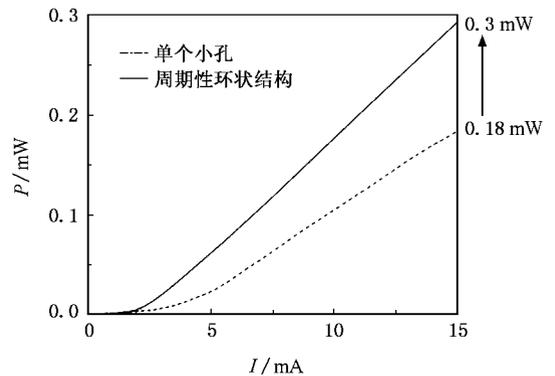


图 3 有无周期性结构器件激光的  $P-I$  特性曲线

#### 3.2. 远场特性

本文测量了单个小孔和 SP 调制 NA-VCSEL 在驱动电流 25 mA 下的远场发散角, 如图 4 所示. 远场发散角是评价光束质量的一个重要参数, 它反映了远距离传输时的发散特性. 可以看到具有 SP 调制结构的 NA-VCSEL 远场发散角比没有 SP 调制结构的明显减小, 表明这种结构对光束具有一定约束作用. 并且远场垂直发散角 ( $\theta_{\perp}$ ) 和水平发散角 ( $\theta_{\parallel}$ ) 之间的数值很接近, 光斑基本为圆形.

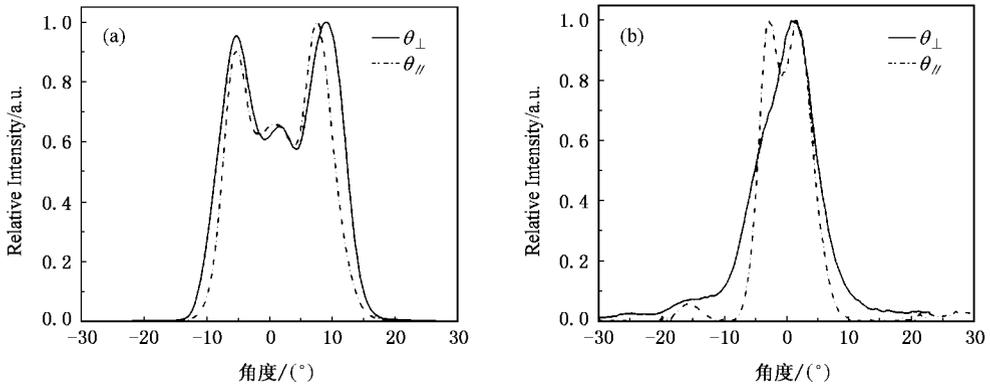


图4 (a)NA-VCSEL 远场图 (b)SP 调制 NA-VCSEL 远场图

为进一步验证这一结论,利用二维时域有限差分方法模拟计算了微小孔周围的光束传播情况,图5为二维计算模型结构示意图.这里入射光为高斯波,半径  $1\ \mu\text{m}$ ,绝缘层的厚度  $300\ \text{nm}$ ,金属层的厚度  $100\ \text{nm}$ ,小孔的直径为  $200\ \text{nm}$ ,周围光栅的周期  $400\ \text{nm}$ .根据修正的德拜模型(Debye model)<sup>[12]</sup>,金属的频变复介电常数特性可用下式表示:

$$\epsilon(\omega) = \epsilon_{\infty} - \frac{\epsilon_{\infty} - \epsilon_{\text{dc}}}{1 + j\omega\tau} + \frac{\sigma}{j\omega\epsilon_0},$$

式中  $\epsilon_{\infty}$  为无限高频相对介电常数,  $\epsilon_{\text{dc}}$  是静态的介电常数,  $\sigma$  是电导率,  $\tau$  是弛豫时间,  $\omega$  为角频率.这些参数可以通过对特定频段上的实际测量数据进行

拟合而得到.模拟结果如图6所示.可以看出,有无周期性光栅结构 NA-VCSEL 的光束在距离金属层表面上方  $1\ \mu\text{m}$  处的宽度分别为  $2\ \mu\text{m}$  和  $1\ \mu\text{m}$ .说明这种结构对光束具有一定束缚作用,和前面实验得到的结果一致.



图5 二维计算模型结构示意图

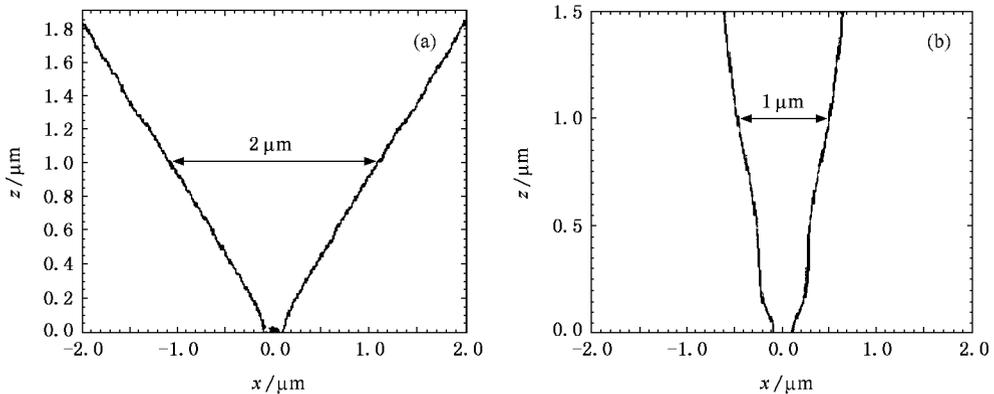


图6 (a)NA-VCSEL 光束空间发散情况 (b)SP 调制 NA-VCSEL 光束空间发散情况

## 4. 结 论

在普通  $850\ \text{nm}$  VCSEL 基础上制备了 SP 调制的 NA-VCSEL. 当小孔尺寸为  $200\ \text{nm}$ , 周围光栅周期  $400\ \text{nm}$  时, 在  $15\ \text{mA}$  驱动电流下最大输出光功率达

到了  $0.3\ \text{mW}$ . 从实验和理论两方面分析了小孔周围周期性光栅结构对光束的约束作用. SP 增强有助于实现高分辨的光学近场 VCSEL 探针, 在新型光子和光电子器件中具有广阔的应用前景. 今后将继续开展这方面的研究, 优化光栅结构, 进一步提高 NA-VCSEL 的输出光功率, 改善其光学特性.

感谢北京大学的徐军老师在器件制备过程中提供的帮助.

- [ 1 ] Ohtsu M 1998 *Near-field Nano/Atom Optics & Technology* ( Tokyo : Springer-Verlag )
- [ 2 ] Betzig E , Trautman J K , Wolfe R , Gyorgy E M , Finn P L 1992 *Appl. Phys. Lett.* **61** 142
- [ 3 ] Partovi A , Peale D , Wuttig M , Murray C A , Zydzik G , Hopkins L , Baldwin K , Hobson W S , Wynn J , Lopata J , Dhar L , Chichester R 1999 *Appl. Phys. Lett.* **75** 1515
- [ 4 ] Shinada S , Koyama F , Nishiyama N , Arai M , Goto K , Iga K 1999 *Jpn. J. Appl. Phys.* **38** 1327
- [ 5 ] Hashizume J , Koyama F 2004 *Appl. Phys. Lett.* **84** 3226
- [ 6 ] Thio T , Pellerin K M , Linke R A , Lezec H J , Ebbesen T W 2001 *Opt. Lett.* **26** 1972
- [ 7 ] William L , Alain D , Thomas W 2003 *Nature* **424** 824
- [ 8 ] Gan Q Q , Song G F , Yang G H , Xu Y , Gao J X , Li Y Z , Cao Q , Chen L H 2006 *Appl. Phys. Lett.* **88** 121111
- [ 9 ] Song G F , Gan Q Q , Qu X , Fang P Y , Gao J X , Cao Q , Xu J , Kang X N , Xu Y , Zhong Y , Yang G H , Chen L H 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 5609 ( in Chinese ) [ 宋国峰、甘巧强、瞿欣、方培源、高建霞、曹青、徐军、康香宁、徐云、钟源、杨国华、陈良惠 2005 物理学报 **54** 5609 ]
- [ 10 ] Pendry J , Martin L , Garcia-Vidal F J 2004 *Science* **305** 847
- [ 11 ] Barnes W L , Murray W A , Dintinger J , Devaux E , Ebbesen T W 2004 *Phys. Rev. Lett.* **92** 107401
- [ 12 ] Kunz K S , Luebbers R J 2000 *The Finite Difference Time Domain Method for Electromagnetics* ( Boca Raton , Florida :CRC Press )

## Surface plasmon modulated nano-aperture vertical-cavity surface-emitting laser<sup>\*</sup>

Gao Jian-Xia<sup>†</sup> Song Guo-Feng Guo Bao-Shan Gan Qiao-Qiang Chen Liang-Hui

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

( Received 8 January 2007 ; revised manuscript received 27 February 2007 )

### Abstract

Surface plasmon modulated nano-aperture vertical-cavity surface-emitting lasers were fabricated from common 850 nm VCSELs. When the diameter of the aperture was 200 nm , and the period of grating was 400 nm , the maximum far-field output power reached 0.3mW at a driving current of 15 mA. The fabrication process was described and the beaming properties were studied via experimentally and theoretically.

**Keywords :** surface plasmon , nano-aperture VCSELs , output power , far-field property

**PACC :** 4260D , 4255P

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

<sup>†</sup> E-mail : jxgao@red.semi.ac.cn