

doi: 10.3788/lop47.041401

# 具有金属纳米颗粒结构的微小孔面发射激光器

高建霞<sup>1</sup> 王岭娥<sup>1</sup> 宋国峰<sup>2</sup><sup>1</sup>河北理工大学信息学院, 河北 唐山 063009; <sup>2</sup>中国科学院半导体研究所纳米光电子实验室, 北京 100083)

**摘要** 在普通 850 nm 垂直腔面发射激光器基础上制备出带有金属纳米颗粒结构的微小孔径垂直腔面发射激光器。当小孔和金属颗粒的直径分别为 400 nm 和 100 nm 时, 其最大输出光功率达到 0.5 mW。介绍了该器件的制备工艺, 从实验和理论两方面验证了金属纳米颗粒结构激发局域表面等离子体, 从而使输出光功率得到提高。

**关键词** 激光器; 局域表面等离子体; 金属纳米颗粒; 输出光功率; 时域有限差分法

中图分类号 TN248.4 OCIS 140.39480 160.4236 文献标识码 A

## Nanoaperture Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser with Metal Nano-Particle

Gao Jianxia<sup>1</sup> Wang Ling'e<sup>1</sup> Song Guofeng<sup>2</sup>

<sup>1</sup>School of Information, Hebei Polytechnic University, Tangshan, Hebei 063009, China  
<sup>2</sup>Nano-Optoelectronics Laboratory, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China

**Abstract** Nano-aperture vertical-cavity surface-emitting lasers (VCSELs) with metal nano-particle are fabricated based on common 850 nm VCSELs. When the diameters of the aperture and the metal nano-particle are 400 nm and 100 nm respectively, the maximum far-field output power reaches 0.5 mW. The fabrication process is introduced and the output power enhancement due to localized surface plasmon is also analyzed by experiment and theory.

**Key words** lasers; localized surface plasmon; metal nano-particle; output power; finite-difference time-domain

### 1 引言

由于受到光学衍射的限制, 传统的光存储技术能达到的存储密度有限。因而, 利用近场光存储实现高密度信息存储已经得到越来越多的重视<sup>[1,2]</sup>。高质量近场光源是一个重要的研究方向。在应用过程中, 对于近场光源一个突出的问题就是实现高输出功率密度。为了进一步改善和增强纳米光学研究和应用技术, 近年来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<sup>[3-6]</sup>, 在光电集成方面具有巨大的潜力。具有表面等离子体结构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<sup>[7]</sup>针对微小孔径垂直腔面发射激光器(NA-VCSEL)已经进行了大量深入的研究, 为了进一步提高微小孔器件的输出光功率, 本文展开了对异型孔径的研究。介绍了具有金属纳米颗粒结构 NA-VCSEL 的制备工艺, 并从实验和理论两方面分析了金属纳米颗粒的透射增强作用。

收稿日期: 2009-10-19; 收到修改稿日期: 2009-10-27

作者简介: 高建霞(1979—), 女, 博士, 讲师, 主要从事光学存储器件方面的研究。E-mail: gjx79@126.com

## 2 器件的制备

具有金属纳米颗粒结构的 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淀积一层  $\text{SiO}_2$  和  $\text{SiN}_x$  的增透膜。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具有纳米金属颗粒的微孔。图 1 为具有金属纳米颗粒结构 NA-VCSEL 的扫描电子显微镜(SEM)形貌图，其中小孔和金属纳米颗粒的直径分别为 400 nm 和 100 nm。

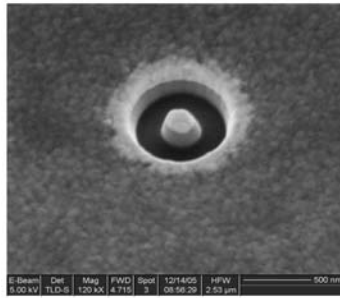


图1 具有金属纳米颗粒结构的 NA-VCSEL 的 SEM 形貌图  
Fig.1 SEM graph of an aperture with a metal nano-particle

## 3 实验结果与分析

图 2 为测试微小孔器件远场输出光功率的简易装置图。图 3 为制备得到的具有金属纳米颗粒的微小孔径垂直腔面发射激光器激励的  $L-I-V$  曲线，从图可以看出其最大输出光功率达到 0.5 mW。对于没有金属颗粒结构的相同尺寸的微小孔，可达到的最大输出光功率为 0.3 mW<sup>[8]</sup>，这表明金属纳米颗粒结构提高了微小孔器件的输出光功率。

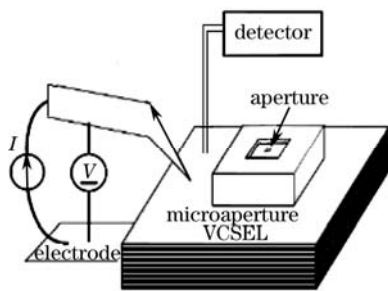


图 2 NA-VCSEL 远场输出光功率测试系统装置图  
Fig.2 NA-VCSEL far-field power measurement setup

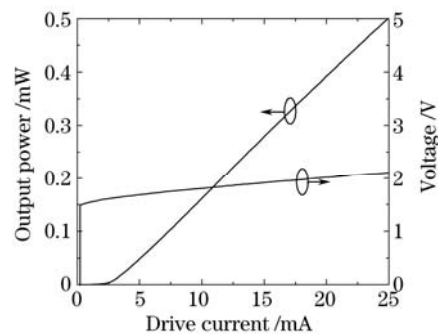


图 3 具有金属纳米颗粒的 NA-VCSEL 的  $L-I-V$  特性曲线  
Fig.3  $L-I-V$  characteristics of NA-VCSEL with a Au nano-particle in the nanoaperture

为了进一步验证金属纳米颗粒对光场的透射增强作用，利用时域有限差分算法，建立二维器件模型对该结构进行模拟研究，得到单个圆孔(直径 400 nm)和具有金属纳米颗粒(小孔和金属颗粒的直径分别为 400 nm 和 100 nm)时在 XZ 平面的稳态光场分布，结果分别如图 4(a)和(b)所示。可以看出，当圆孔中有金属纳米颗粒时，其附近的光场得到了增强。

除了平面的表面等离子体，在这种金属颗粒或真空颗粒的其他一些拓扑结构中，需要考虑局域化的表面等离子体激发。这种在有界限的几何结构中激发的表面等离子体称为局域表面等离子体<sup>[9,10]</sup>。纳米金属颗粒对微小孔器件的光场透射增强作用正是由于在金属颗粒附近产生了局域的表面等离子体效应。

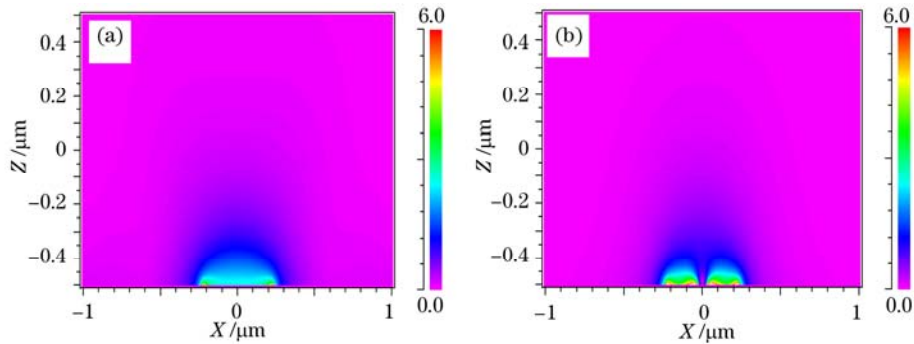


图4 圆孔(a)和有金属颗粒(b)在XZ平面的稳态光场分布

Fig.4 Static light field distribution in XZ plane through a circle aperture(a) and through an aperture with Au nano-particle(b)

## 4 结 论

在普通 850 nm 垂直腔面发射激光器基础上制备出带有金属纳米颗粒的微小孔径垂直腔面发射激光器。当小孔直径为 400 nm，金属颗粒为 100 nm 时，其最大输出光功率达到 0.5 mW。介绍了该器件的制备工艺，并从实验和理论两方面验证了该结构对光场的透射增强作用。在今后的研究工作中如能够基于近场光学的理论和探测方法，对近场光学光场的分布、纳米局域光场和物质的相互作用有更加深入的理解，则可设计出性能更加优异的异型孔径。

致谢：感谢北京大学的徐军老师在器件制备过程中提供的帮助。

## 参 考 文 献

- 1 M. Ohtsu. Near-field Nano/Atom Optics & Technology[M]. Tokyo: Springer-Verlag, 1998. 1~7
- 2 E. Betzig, J. K. Trautman, R. Wolfe *et al.*. Near-field magneto-optics and high density data storage[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1992, **61**(2): 142~145
- 3 J. Hashizume, F. Koyama. Plasmon-enhancement of optical near-field of metal nanoaperture surface-emitting laser[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2004, **84**(17): 3226~3228
- 4 T. Thio, K. M. Pellerin, R. A. Linke *et al.*. Enhanced light transmission through a single subwavelength aperture[J]. *Opt. Lett.*, 2001, **26**(24): 1972~1974
- 5 Bin Wu, Qingkang Wang. Design optimization of highly sensitive LSPR enhanced surface plasmon resonance biosensors with nanoholes[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2008, **6**(5): 323~326
- 6 Zhang Zongsuo, Cheng Mutian, Liu Shaoding *et al.*. Scattering properties of periodic arrays of nanoholes in thin gold film[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2008, **45**(8): 54~58  
张宗锁, 程木田, 刘绍鼎 等. 带有周期排列纳米孔结构金薄膜的散射光学性质[J]. *激光与光电子学进展*, 2008, **45**(8): 54~58
- 7 Gao Jianxia, Song Guofeng, Gan Qiaoqiang *et al.*. Surface plasmon modulated nano-aperture vertical-cavity surface-emitting laser[J]. *Laser Phys. Lett.*, 2007, **4**(3): 234~237
- 8 Gao Jianxia, Song Guofeng, Gan Qiaoqiang *et al.*. Fabrication and characteristics analysis of nano-aperture vertical-cavity surface-emitting laser[J]. *Chinese J. Semiconductors*, 2007, **28**(2): 265~268  
高建霞, 宋国峰, 甘巧强 等. 纳米孔径垂直腔面发射激光器的制备及特性[J]. *半导体学报*, 2007, **28**(2): 265~268
- 9 Jiro Haashizume, Fumio Koyama. Plasmon enhanced optical near-field probing of metal nanoaperture surface-emitting laser[J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(25): 6391~6396
- 10 Anatoly V. Zayats, Igor I. Smolyaninov. Near-field photonics: surface plasmon polaritons and localized surface plasmons[J]. *J. Opt. A*, 2003, **5**(4): S16~S50