

微小孔阵列垂直腔面发射激光器的研究

高建霞¹ 宋国峰²

(¹河北理工大学信息学院, 河北 唐山 063009; ²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 980 nm 波长的大功率垂直腔面发射激光器(VCSEL)的基础上制备了高输出功率的微小孔阵列半导体激光器, 其最大输出光功率达到了 1 mW。介绍了针对微小孔阵列垂直腔面发射激光器的特殊制备工艺, 并对其特性进行了分析。

关键词 激光器; 近场光学; 垂直腔面激光器; 输出光功率; 时域有限差分法

中图分类号 TN248.4 OCIS 140.2010 250.7260 文献标识码 A

Study of Subwavelength Hole Array Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser

Gao Jianxia¹ Song Guofeng²

(¹College of Information Hebei Polytechnic University, Tangshan, Hebei 063009, China)
(²Nano-Optoelectronics Laboratory, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

Abstract Subwavelength hole array vertical-cavity surface-emitting laser (VCSEL) is fabricated based on high power 980 nm VCSEL. The far-field output power reaches 1 mW. The special fabrication process is introduced and the characteristic of the device is also analyzed.

Key words laser; near-field optics; vertical-cavity surface-emitting laser; output power; finite difference time domain

1 引言

1999 年 S.Shinada 等^[1]首次在垂直腔面发射激光器(VCSEL)基础上制备了微小孔垂直腔面发射激光器(NA-VCSEL)。随后 J.Hashizume 等^[2]利用 NA-VCSEL 制成了高效近场光学探针以实现更高的分辨率。对于光学存储, 应该达到的功率密度为 $10 \text{ mW}/\mu\text{m}^2$, 这个数字和目前所能得到的最大功率密度还有一定差距。随着表面等离子体亚波长光学研究的升温, 人们提出了利用金属表面等离子体效应来提高器件的透射强度^[3~5]。T.W.Ebbesen 等^[6]发现在金属膜层上制作一系列亚波长量级的周期性孔阵后透射的光能量与总能量的比值大于孔径本身面积与入射光总面积的比值, 也就是说并非只有射向孔径部分的光发生了透射, 一部分本该被金属膜阻挡的光波也发生了透射, 从而达到提高透射率的目的。K.Goto 等^[7]充分利用 VCSEL 的特点, 尤其是其优越的光学特性发展 NA-VCSEL 及其阵列作为近场光存储光源, 实现了多光束并行读写以达到超高密度存储和超快速率数据传输的要求。

本文针对微小孔垂直腔面发射激光器已经进行了较深入的研究^[8,9], 为了进一步提高微小孔器件的输出光功率, 展开了对微小孔阵列半导体激光器的研究。介绍了在 N 面出光 980 nm 波长的大功率垂直腔面发射激光器的基础上制备微小孔阵列垂直腔面发射激光器的制备工艺, 并对其特性进行了分析研究。

收稿日期: 2009-12-21; 收到修改稿日期: 2010-01-13

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 器件制备与实验装置

微小孔阵列垂直腔面发射激光器是在 N 面出光 980 nm 波长的大功率垂直腔面发射激光器的基础上制造的, 对其做了一些特殊的工艺处理。面发射激光器一般可以制作成顶部发射和底部发射。由于顶部发光的器件电流分布不均匀、光场空间模式不好, 而且在大功率工作时, 散热比较困难, 所以采用底部出光的 980 nm 微小孔阵面发射激光器。

微小孔阵列 VCSEL 器件的具体制备工艺如下:

1) 首先利用湿法氧化法制备得到 N 面出光 980 nm VCSEL。

2) 在 N 面利用磁控溅射法镀一层 Ti(5 nm)/Au(100 nm) 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 的作用是阻挡住激光器出光腔面正常的输出光, 因为金在 980 nm 波长下具有很高的反射率, 可以达到 98% 左右。

3) 利用聚焦离子束(FIB)系统在出光窗口中心位置刻蚀出亚波长尺寸的小孔阵列。FIB 的分辨率为 7 nm 左右。

图 1 为微小孔阵器件出光腔面的扫描电子显微镜(SEM)形貌图, 其中单个微小孔的尺寸为 $400\text{ nm} \times 400\text{ nm}$, 阵列的周期为 $1.6\text{ }\mu\text{m} \times 1.6\text{ }\mu\text{m}$, 刻蚀深度为 40 nm。当在金属膜上制备小孔阵列时, 对金属层的均匀性和出光孔表面的清洁度要求比较高。如果表面金属层溅射不均匀, 刻蚀孔阵时碰到金属颗粒上, 则易出现打不透的现象。对于刻蚀时间的控制也有一定困难, 所以要保证在溅射金属后表面具有很高的平整性和致密性, 这也是制作工艺中的一个难点。图 2 为测试系统的简易装置图。

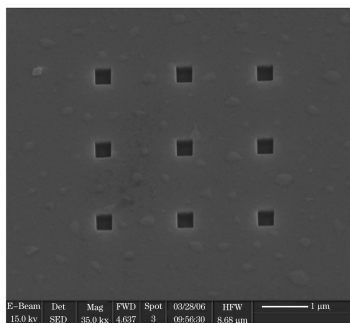


图1 微小孔阵列的 SEM 形貌图

Fig.1 SEM photograph of subwavelength hole array

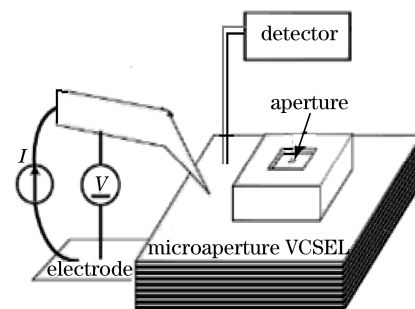


图 2 测试系统装置图

Fig.2 Sketch map of measure system

3 实验结果与分析

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[10, 11], 一般如果远场光强高, 则近场光强通常也比较高。图 3(a)和(b)分别为制备得到的微小孔阵列器件激光的 $L-I-V$ 曲线和光谱图, 可以看到其最大输出光功率达到了 1 mW, 激光波长 976.2 nm。输出光功率相对于单个微小孔器件有一定的增强, 透射效率按孔的面积进行归一化则超过了 1, 即透过的能量大于孔所占面积的百分比, 所以光有效集中地穿过了小孔, 并且撞到孔间金属上的光也会发生透射。

对于这种阵列结构的透射增强作用最普遍的解释是基于入射光会激发金属薄膜内的表面等离子体(SP)偏振, 这种表面等离子体偏振的共振作用会对通过薄膜的光产生巨大的增强。和光子晶体对应的, 这种结构可以称为表面等离子体激元晶体, 该结构的电磁场增强发生在激发表面等离子体共振的金属表面。激元晶体的光学特性来自光与周期性结构的相互作用, 由于这种相互作用, SP 共振在周期性结构中的传播会导致色散关系的变化。这种相互作用导致 SP 共振之间的转变以及 SP 共振和光之间的转变, 而 SP 和光之间的转变是透射增强的原因。只有满足布洛赫波产生条件时才能激发 SP 共振并且导致透射增强, 由于布洛

赫波的不同传播方向导致了表面上方透射光的特定近场分布。不同波长透射增强所对应的 SP 共振布洛赫波具有不同的近场分布对称性, 通过 SP 共振态的光子隧穿导致了透射增强。周期性孔阵散射导致 SP 共振光之间的有效耦合效率, SP 共振的激发条件强烈地依赖于周期性结构的参数, 如孔的间隔、直径等。另外, 这种增强作用与金属膜的种类、厚度等因素都有一定关系。

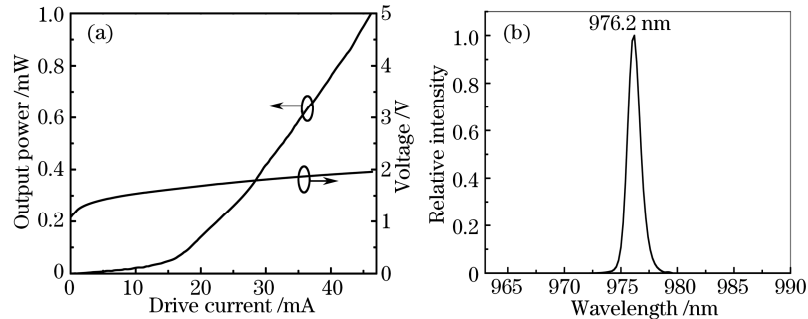


图3 微小孔阵列 VCSEL 的 $L-I-V$ 特性曲线(a)和激光光谱(b)
Fig.3 $L-I-V$ curves (a) and spectra (b) of subwavelength hole array VCSEL

4 结 论

在 N 面出光 980 nm 波长的大功率垂直腔面发射激光器的基础上制备出了微小孔阵列垂直腔面发射激光器, 其最大输出光功率达到 1 mW, 并对器件的特性进行了分析研究。

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 S. Shinada, F. Koyama, N. Nishiyama *et al.*. Fabricated of micro-aperture surface emitting laser for near field optical data storage[J]. *Jpn. J. Appl. Phys.* 1999, **38**: 1327~1329
- 2 J. Hashizume, S. Shinada, F. Koyama. Near-field optical probing using a microaperture GaInAs/GaAs surface emitting laser[J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2002, **41**: 700~702
- 3 A. Krishnan. Evanescently coupled resonance in surface plasmon enhanced transmission[J]. *Opt. Commun.*, 2001, 200(12):1~3
- 4 A. Degiron, H. J. Lezec, W. L. Barnes *et al.*. Effects of hole depth on enhanced light transmission through subwavelength hole arrays[J]. *Appl. Phys. Lett.* 2002, 81(23): 4327~4329
- 5 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
- 6 T. W. Ebbesen, H. J. Lezec, H. F. Ghaemi *et al.*. Extraordinary optical transmission through subwavelength hole arrays[J]. *Nature*, 1998, 391 (6668): 667~669
- 7 K. Goto, Y. J. Kim, T. Kirigaya *et al.*. Near-field evanescent wave enhancement with nanometer-sized metal grating and microlens array in parallel optical recording head[J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2004, **43**: 5814
- 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 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
- 10 Xiaolei Shi. Single Subwavelength Aperture for Near Field Applications[D]. California: Stanford University, 2003. 56~60
- 11 Fang Chen. A Study of Very-Small-Aperture Lasers for Near-field Recording[D]. Pittsburgh: Carnegie Mellon University, 2003. 62~65