

微小孔径激光器的工艺及器件功率和寿命特性分析*

宋国峰¹⁾ 甘巧强^{1)†} 瞿欣³⁾ 方培源³⁾ 高建霞^{1)‡} 曹青¹⁾
徐军⁴⁾ 康香宁⁴⁾ 徐云^{1)‡} 钟源^{1)‡} 杨国华^{1)‡} 陈良惠¹⁾

1) 中国科学院半导体研究所, 北京 100083)

2) 中国科学院研究生院, 北京 100039)

3) 复旦大学材料科学系, 上海 200433)

4) 北京大学物理系, 北京 100871)

(2005 年 1 月 6 日收到, 2005 年 6 月 28 日收到修改稿)

在 650 nm 波长半导体激光器的基础上制造出了高输出功率的微小孔径激光器. 驱动电流为 25 mA 时, 输出功率达到 0.4 mW, 最大功率可达 1 mW 以上. 叙述了微小孔径激光器的特殊的制造工艺, 并分析了器件可能的失效机理.

关键词: 近场光学, 微小孔径激光器, 半导体激光器, 失效分析

PACC: 0779, 0650, 6146, 4280T

1. 引言

随着信息化程度的不断提高, 人们对信息存储密度的要求越来越高. 传统的光信息存储技术的存储密度主要受限于经典光学的衍射分辨率极限. 如果要使存储密度继续提高, 就必须突破经典光学的衍射分辨率极限. 光束汇聚的极限光斑直径 S 表达式为

$$S = \frac{\lambda}{n \sin \theta_m}. \quad (1)$$

S 直接体现数据存储的密度, S 越小单位面积上的存储密度越高. (1) 式中 n 是光盘材料折射率, λ 是入射光波长, θ_m 是光束经过透镜后的汇聚角度 (图 1).

根据 (1) 式, 要使 S 减小从而提高数据存储密度, 主要有两种方法. 第一种是增加频率、减小波长. 从红光存储到蓝光存储就是利用蓝光的衍射分辨率极限 S 小于红光. 第二种是增加折射率 n . 新近发展起来的固体浸没透镜 (solid immersion lens) 方法就是利用光在高折射率介质中波长减小的特点提高存储密度. 除此之外, 人们还发现了第三种提高分辨率的手段, 就是利用近场光学的隐失波来作为微区探测

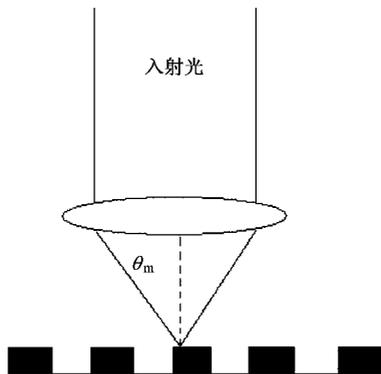


图 1 传统光盘系统示意图

或光盘读写的信号. 在这样的背景下, 近场光学得到了飞速发展.

1991 年, 文献 [1] 开发出单模光纤探针和激光探测技术, 他们用探针将近场信号耦合出来作为探测信号, 为近场光学的实用化铺平了道路. 但单模光纤探针的缺点在于光强很弱, 严重影响了探测效率. 1999 年, 文献 [2] 从解决光纤探针通光效率低的方面着手, 抛弃了传统的光纤探针, 在 980 nm 半导体激光器的基础上采用微小孔径激光 (VSAL) 技术, 取得了探针型近场存储的突破性进展. 文献 [2] 的小孔

* 国家高技术研究发展计划 (批准号 2002AA313060) 资助的课题.

† E-mail: gqg@red.semi.ac.cn

大小为 50—400 nm, 出光功率为 $10 \mu\text{W}$ (50 nm)— 1 mW (250 nm), 功率密度为 $10 \text{ mW}/\mu\text{m}^2$, 数据传输速度为 24 Mb/s, 获得的通光效率比普通光纤探针提高了 10^4 倍以上, 达到 8%. 2001 年, 文献[3]在商用 635—655 nm 的边发射激光器上制作了 VSAL, 但是他们的成品出光功率较低. 在小孔设计理论方面, 文献[4,5]提出了能大幅度增加近场输出功率的 C 型微孔设计. 以后又有不同的研究组提出了诸如 I 型、H 型、Bowtie^[6-8]、分形复杂构型^[9]以及表面等离子体激元调制的小孔设计^[10,11]. 到目前为止, 这些异型小孔尚缺乏实际的实验结果来证明其优越性. 一些研究组还开展了基于垂直腔面发射激光器的微小孔径激光器的研究^[12,13]. 为了推进微小孔径激光器的实用化, 这种激光器的器件性能也得到了初步的研究^[14]. 综上所述可以看出, 制造高输出功率的纳米光源已经成为光电子、光存储、亚波长光学等领域方兴未艾的研究热点.

我们在 650 nm 波长半导体激光器的基础上制造出了高输出功率的微小孔径激光器. 本文中给出了微小孔径激光器的制作工艺和相关性能分析, 还利用时域有限差分 (FDTD) 方法模拟计算, 对器件性能作出了一定的解释.

2. 器件制造工艺

我们的小孔激光器的制造工艺是在商用 650 nm 半导体激光器的工艺基础上增加了一些针对小孔激光器的特殊步骤.

(1) 在普通 650 nm 激光条制造完成后, 先在激光器前腔面上蒸镀介质膜.

(2) 然后蒸镀 100 nm 厚的金层, 其目的是要把正常激光器的出光完全阻挡住. 如果镀金之后激光器的前腔面仍然有强光出射, 就说明金层没有能够阻挡住有源区. 我们用发光显微镜 (photon emission microscopy, PEM) 观察了镀金之后器件前腔面的出光情况 (如图 2 所示), 确定了前腔面有源区的位置没有出光. 虽然其他地方有一些光泄漏, 但这样的情况已经足以说明前腔面镀金阻挡了正常的出光.

(3) 利用分辨率为 7 nm 的聚焦离子束 (FIB) 系统在镀金后的激光器前腔面上打孔. 小孔边长为 $250 \text{ nm} \times 500 \text{ nm}$ (如图 3 所示). 在 FIB 打孔时, 离子束的打孔深度很难控制. 如果金层没有被完全刻蚀掉, 小孔部分的激光将无法顺利透射出来. 如果刻蚀

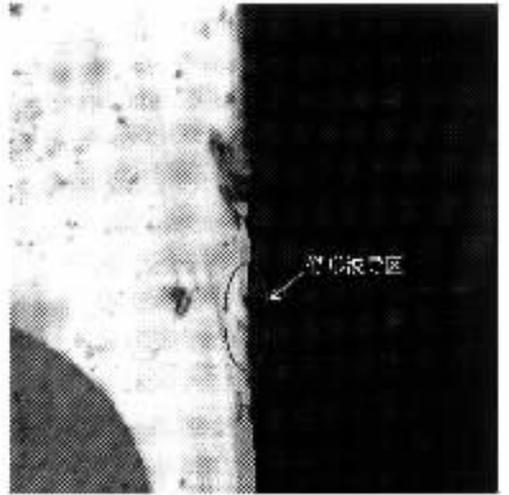


图 2 镀金以后激光器前腔面的 PEM 照片. 图中可见前腔面脊型波导的位置没有出光.

过深, 破坏到激光器腔面, 激光器特性会立即损坏. 介质膜在这里起到了保护腔面的作用.

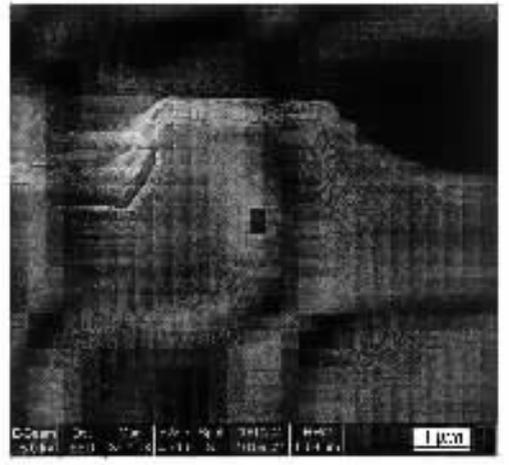


图 3 FIB 打孔之后形成的 VSAL 腔面形貌图. 小孔边长为 $250 \text{ nm} \times 500 \text{ nm}$.

3. 器件特性测试和失效分析

3.1. 器件性能测试

在打孔之前需要测试器件的性能. 因为在常规工艺步骤之中增加了两步特殊工艺, 器件的成品率会大大下降, 所以我们需要确定激光器在腔面镀金工艺之后是否还能够激射. 只有后腔面出光的光功率-电流 ($P-I$) 曲线有激射特性的样品才能用于接下来的制造工序. 图 4 是镀金之后器件后腔面的 $P-I$

曲线.

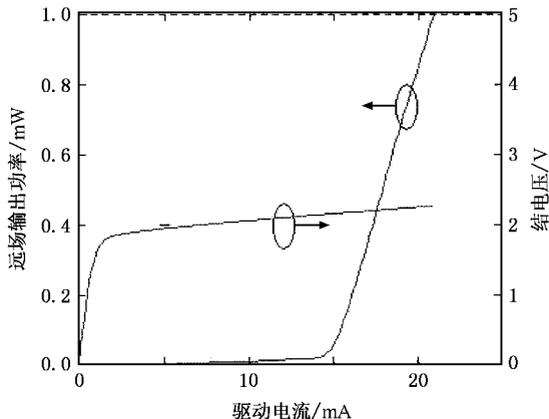


图4 镀金之后激光器后腔面激励的 P-I 曲线

按照上述工艺步骤制作出的小孔激光器的 P-I 曲线如图 5 所示. 驱动电流 25 mA 时出光功率达到 0.4 mW 以上. 图 6 给出了光学显微镜下观察到的小孔出射光斑的照片. 可以看到由于微小孔径的限制, 激光器近场区域的光斑已经比普通激光器的近场光斑有了明显的缩小.

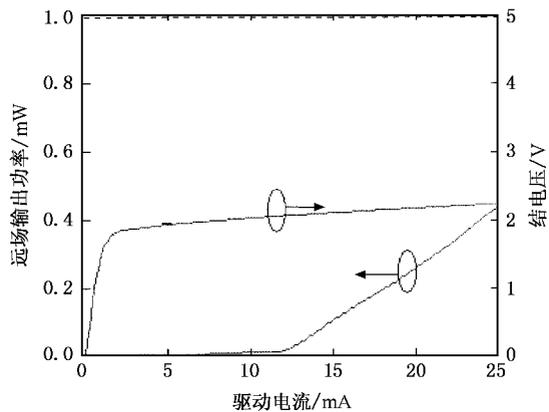


图5 小孔激光器出光的 P-I 曲线

如果进一步加大驱动电流, 输出功率能够进一步增大. 但是器件的寿命并不如普通器件的长. 驱动电流较大时, 小孔激光器比普通器件更容易失效. 我们对普通商用 650 nm 波长半导体激光器和小孔激光器分别做了恒功率失效试验和恒流失效测试. 实验结果如图 7 和图 8 所示. 比较图 7 和图 8 可以看出, 即使大电流驱动下的普通商用激光器的寿命也要远远高于较小驱动电流下的小孔激光器的寿命. 小孔激光器寿命很短, 实验中的寿命测试结果仅约 240 min, 这将成为该器件未来实用化的一大障碍,



图6 光学显微镜下观察到的 VSAL 近场光斑

需要加以深入研究.

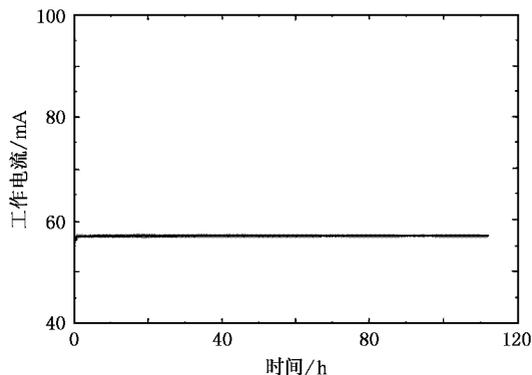


图7 普通商用 650 nm 波长半导体激光器 50 °C, 20 mW 条件下恒功率测试结果

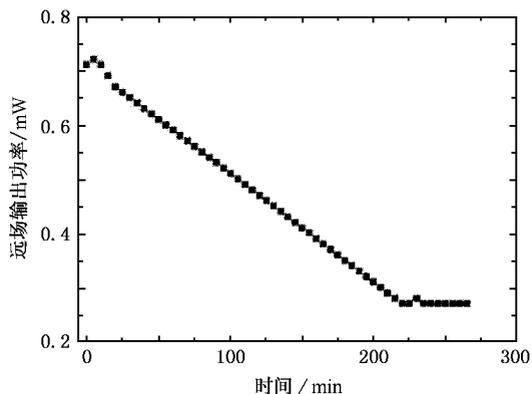


图8 小孔半导体激光器室温条件下 25 mA 恒流测试结果

3.2. 失效机理分析

我们对 VSAL 的失效机理进行了初步的分析.

导致 VSAL 失效的原因较为复杂,其中一个主要原因是腔面镀金对激光器产生的强光反馈使阈值电流下降.在相同驱动电流条件下,VSAL 内部比普通激光器内部的功率密度高(此失效机理详见文献[14]).这会导致激光器内部温度升高,失效加快.

从工艺上分析,则可能是成孔过程中激光器腔面受到的损伤导致器件失效.

任何腔面都有一个饱和功率密度,一旦通过腔面的功率密度超过这个限制,就会引起腔面光学灾变,产生失效.为进一步分析这一失效的物理原因,我们用 FDTD 方法^[15]计算了小孔附近的光束传播情况.计算模型如下:入射光是半径为 $0.8 \mu\text{m}$ 的高斯光束,沿 y 方向偏振(图 9 的纵坐标方向),金层厚度为 100 nm ,上面开有一个边长为 300 nm 的正方形小孔.根据 Drude 模型^[16],金属的频变复介电常数特性如下:

$$\epsilon(\omega) = \epsilon_{\infty} + \frac{\epsilon_s - \epsilon_{\infty}}{1 + j\omega t_0} + \frac{\sigma}{j\omega\epsilon_0}, \quad (2)$$

式中 ϵ_{∞} 是无限高频相对介电常数, ϵ_s 是静态介电常数, t_0 是弛豫时间, σ 是导电率.

如图 9 所示,在小孔周围分布的能流在小孔的位置出现汇聚,该位置的能流密度要比其他部分的能流密度大.随着驱动电流增大器件功率增大,在金层内部两个腔面处的能流密度也随之增大.半导体激光器前后腔面能够承受的能流密度有一定限度,一旦超过该限度就会出现光学腔面灾变^[17].这可能是器件失效的另一个主要原因.而小孔的存在导致腔面位置的光场重新分布,小孔内部区域的能流密度要明显高于其他部分.即使器件内部平均能流

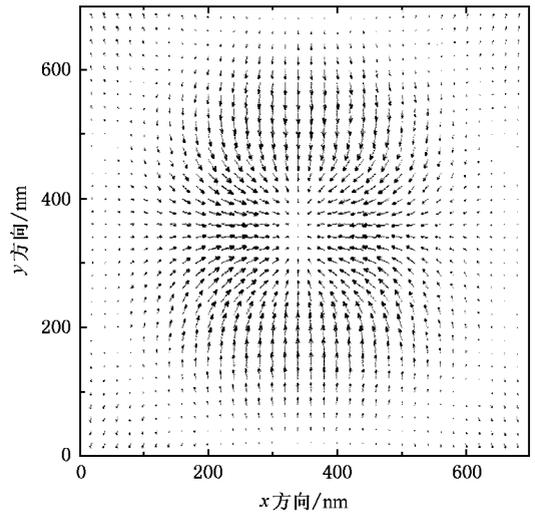


图 9 小孔激光器内部金膜上方 40 nm 处的能流分布

还没达到上述限度,小孔部分也可能先于其他部分发生灾变,从而导致器件发生失效.

4. 结 论

我们在波长为 650 nm 的商用半导体激光器的腔面镀介质和金属膜层,再用 FIB 在金属膜层上刻蚀纳米级的小孔,成功地制造出了高输出功率的小孔激光光源.当驱动电流为 25 mA 时,输出功率可达到 0.4 mW 以上.我们还对器件的失效机理做了初步分析.这样的小孔光源在近场光学存储、微区光探测、微区光刻等纳米光学、亚波长光学技术领域都将有广阔的应用前景.

[1] Betzig E, Trautman J K, Wolfe R *et al* 1992 *Appl. Phys. Lett.* **61** 142
 [2] Partovi A, Peale D, Wuttig M *et al* 1999 *Appl. Phys. Lett.* **75** 1515
 [3] Chen F, Zhai J, Stancil D D *et al* 2001 *Jpn. J. Appl. Phys.* **40** 1794
 [4] Shi X, Thornton R L, Hesselink L 2002 *Proc. SPIE* **4342** 320
 [5] Shi X, Hesselink L, Thornton R L 2003 *Opt. Lett.* **28** 1320
 [6] Tanaka K, Tanaka M 2002 *J. Microsc.* **210** 294
 [7] Sendur K, Challener W 2002 *J. Microsc.* **210** 279
 [8] Jin E X, Xu X 2005 *Appl. Phys. Lett.* **86** 111106

[9] Matteo J A, Hesselink L 2005 *Opt. Exp.* **13** 636
 [10] Thio T, Pellerin K M, Linke R A *et al* 2001 *Opt. Lett.* **26** 1972
 [11] Lezec H J, Degiron A, Devaux E *et al* 2002 *Science* **297** 820
 [12] Shinada S, Hashizume J, Koyama F 2003 *Appl. Phys. Lett.* **83** 836
 [13] Hashizume J, Koyama F 2004 *Appl. Phys. Lett.* **84** 3226
 [14] Gan Q, Song G, Xu Y *et al* 2005 *Opt. Lett.* **30** 1470
 [15] Remcom Inc 2004 *XFDTD pro V6.1* (Pennsylvania: Remcom Inc)
 [16] Kunz K S, Luebbers R J 2000 *The Finite Difference Time Domain Method for Electromagnetics* (Boca Raton: CRC Press)
 [17] Xu Y, Cao Q, Zhu X *et al* 2004 *Chin. Opt. Lett.* **2** 647

Fabrication process and power and lifetime characteristics of very-small-aperture laser^{*}

Song Guo-Feng¹⁾ Gan Qiao-Qiang^{1)†} Qu Xin³⁾ Fang Pei-Yuan³⁾ Gao Jian-Xia^{1)‡} Cao Qing¹⁾
Xu Jun⁴⁾ Kang Xiang-Ning⁴⁾ Xu Yun^{1)‡} Zhong Yuan^{1)‡} Yang Guo-Hua^{1)‡} Chen Liang-Hui¹⁾

1) *Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China*

2) *Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*

3) *Department of Material Science, Fudan University, Shanghai 200433, China*

4) *Department of Physics, Peking University, Beijing 100871, China*

(Received 6 January 2005 ; revised manuscript received 28 June 2005)

Abstract

High output power very-small-aperture laser has been created on 650 nm edge emitting laser diodes. The far-field output power is 0.4 mW at the 25 mA driving current, and the highest output power exceeds 1 mW. The special fabrication process is described and the failure mechanism leading to the short lifetime of the devices is discussed.

Keywords : near-field optics , very-small-aperture laser , semiconductor laser , failure analysis

PACC : 0779 , 0650 , 6146 , 4280T

^{*} Project supported by the National High Technology Development Program of China (Grant No. 2002AA313060).

[†] E-mail : gqq@red.semi.ac.cn