

文章编号: 0258-7025(2004)06-0659-03

# 基于微细加工技术的微谐振腔型滤波器

宋 康, 李以贵, 陈水良

(上海交通大学微纳米技术研究院薄膜与微细技术教育部重点实验室, 上海 200030)

**摘要** 设计了一种新工艺——利用硅微结构直接作为模具来制作微小固体染料激光器谐振腔型滤波器。首先通过组合刻蚀工艺制作硅模具, 再利用硅模具复制得到微谐振腔。组合刻蚀工艺是采用深层反应离子刻蚀(deep-RIE)再结合 EPW 湿法刻蚀(一种各向异性刻蚀技术)。由于 EPW 湿法刻蚀对 $\langle 110 \rangle$ 面刻蚀速率较慢, 可制作出具有光学镜面的侧壁 $\langle 110 \rangle$ 的硅模具, 利用此模具可复制出正方形固态染料微谐振腔。以激光染料若丹明 6G 掺杂的聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)为工作物质, 在调 Q Nd:YAG 自倍频激光 532 nm 抽运下, 得到 600 nm 波长的激光输出。这种谐振腔可应用在染料激光器和滤波器中, 对其原理、设计、制作工艺和性能都作了介绍。

**关键词** 激光技术; 硅模具; 微细加工技术; 微谐振腔滤波器

**中图分类号** TN 248.1 **文献标识码** A

## Micro-Cavity Filter Based on MEMS Micro-Fabrication Technology

SONG Kang, LI Yi-gui, CHEN Shui-liang

(Key Laboratory for Thin Film and Micro-Frication Technology, Ministry of Education, Institute of Micro/Nanometer Science and Technology, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China)

**Abstract** A novel fabrication technique is designed to obtain silicon crystalline flat planes. The selected silicon crystalline planes  $\langle 110 \rangle$  are pre-obtained by deep-RIE, then EPW wet etch is used to remove the roughness after deep-RIE. Through the two etching process, a silicon mold with smooth sidewall can be got. The proposed technique is demonstrated by fabricating a solid polymer dye micro-cavity laser type filter that is replicated by the silicon mold. The experiment of simple filter confirm that the micro-cavity can work well in a filter.

**Key words** laser technique; silicon mold; micro-fabrication technology; micro-cavity filter

## 1 引 言

微谐振腔是可见光波长染料激光器、波分复用(WDM)器件和可调滤波器的主要部件<sup>[1~3]</sup>, 在光学测量及光通信中有广泛的应用。采用微细加工技术制造光学器件具有精度高、成本低、易于批量生产等优点。复制技术如模压、浇铸等由于成本低, 对于微光学器件的制造很有吸引力, 有望成为这种微型结构的关键技术。这种微型谐振腔的品质因素  $Q$  非常高, 能影响自发辐射, 也可调整输入和输出的空间分布。在谐振腔内加入聚合物可减小发射激光的线宽, 并可增强峰值强度。设计了一种巧妙的方法来制造硅模具, 主要运用了深反应离子刻蚀(deep-

RIE)和 EPW 湿法刻蚀技术。得到的谐振腔表明这种技术是非常有效的。由于硅为金刚石结构, 主切口方向通常为 $\langle 110 \rangle$ 方向, 与主切口方向夹角为  $45^\circ$  的方向正好是 $\langle 100 \rangle$ 方向。沿着与主切口方向夹角为  $45^\circ$  的方向刻蚀, 硅片上得到的正方形的四个侧壁应为 $\langle 110 \rangle$ 面。利用这种硅模制作的聚合物微结构表明各反射面非常光滑, 可在很短的腔内产生激光振荡。

## 2 谐振腔的制作

利用复制技术制作微腔结构, 首先必须制作模具, 模具的基底为一块 $\langle 100 \rangle$ 面的硅片。先将硅片氧

收稿日期: 2003-08-18; 收到修改稿日期: 2003-12-11

作者简介: 宋 康(1980—), 男, 湖北省天门人, 上海交通大学微纳米科学技术研究院硕士研究生, 研究方向为微光机电系统、微传感器与微执行器等。E-mail: kang\_s@sjtu.edu.cn

化,再通过光刻和深反应离子刻蚀初步在硅片上形成方格阵列。深反应离子刻蚀后形成的腔体侧壁并不很光滑,达不到激光器谐振腔的要求。可用一种各向异性湿法刻蚀技术来解决这一问题,湿法刻蚀用的溶液是 ethylenediamine pyrocatechol water (EPW)。EPW 刻蚀的最基本特点是刻蚀后露出的是刻蚀速率最慢的那个面。其中 $\langle 110 \rangle$ 面是刻蚀速率第二慢的面,因为深反应离子刻蚀后的侧壁已经很接近 $\langle 110 \rangle$ 面,只是有些不平滑,短时间刻蚀即可去掉那些不平滑的地方,光滑的 $\langle 110 \rangle$ 面就露出来了,而 $\langle 110 \rangle$ 面与硅片表面 $\langle 100 \rangle$ 是垂直的。利用此构想和工艺,制成一块微型( $176 \mu\text{m} \times 176 \mu\text{m}$ )正方形腔体组成的  $10 \times 10$  谐振腔阵列的硅模具,如图 1 (a)所示。

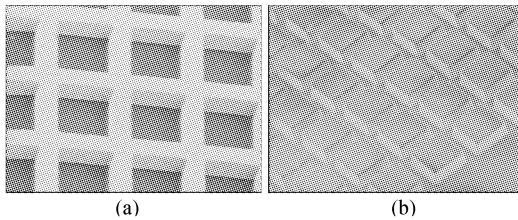


图 1 (a) 硅模具; (b) 复制得到的谐振腔

Fig. 1 (a) Silicon mold; (b) Micro-cavities replicated from the silicon mold

EPW 刻蚀温度为  $115^\circ\text{C}$ , 时间约 2 min。刻蚀后原来的不平滑部分完全被去除,晶面 $\langle 110 \rangle$ 面露出,侧壁表面非常光滑。往模具的腔内甩胶注入激光染料(若丹明 6G)和 PMMA 溶液。此溶液由 9 mL 甲基异丁酮[methylisobutyl ketone (MIBK)], 9 mL 氯苯(chlorobenzene), 2 mL 乙醇(ethanol), 2 g PMMA 和  $4.0 \times 10^{-5}$  mol 若丹明 6G 混合而成。PMMA 是溶质,氯苯和乙醇是溶剂。为方便脱模,溶液注入前先在模子上涂上一层表面活性物质。烘烤温度为  $80^\circ\text{C}$ , 时间为 4 h。然后就可以用手将谐振腔从模子上脱离下来。得到的微腔如图 1(b)所示,一次可得到数百个方形微腔。模子的形状完全被转移到腔体上,侧壁的平整度达到光学要求。

### 3 激光谐振实验

固体染料激光是以若丹明 6G-PMMA 作为激发媒质,通过外部脉冲倍频的 Nd:YAG 激光(波长 532 nm)入射微腔中,当增益超过损耗,随着光在四反射镜间反射不断增强,就可得到激光。光学实验

是在常温下进行的,以倍频的 Nd:YAG 激光作为激励源,脉冲周期为 10 ns,重复频率 10 Hz,入射角  $60^\circ$ 左右,如图 2 所示。谐振腔内的激光通过显微镜的物镜从样品前端收集,产生的其他波长的光可通过滤波器除去,可以观察到每个谐振腔内都有很强的荧光。图 3 所示是以 532 nm Nd:YAG 激光为激励源,染料谐振腔产生的激发状态。图 4 是输出激光的光谱图,不同的曲线分别对应不同功率的激励源激光,可以看出在 600 nm 波长有一个峰值强度。图 5 是输出激光峰值强度与激励源功率的关系图,从图中可看出激励源的阈值功率大约为 23 mW,输出激光峰值强度随着激励源功率增大而增大。谐振腔的品质因素  $Q$  取决于腔的光洁度和大小,当腔内发生光散射或腔变小时,  $Q$  值会变小。

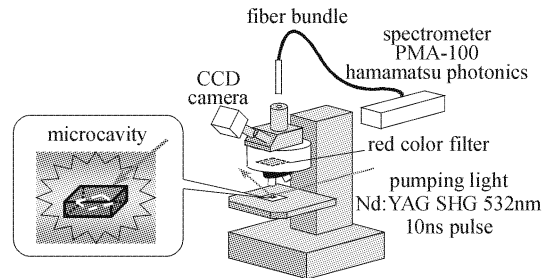


图 2 输出激光检测实验装置

Fig. 2 Setup of detect the output laser

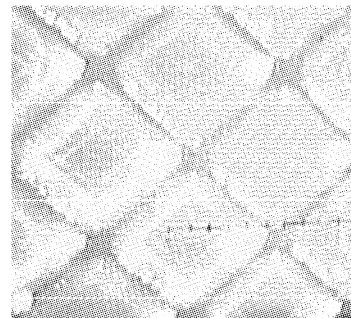


图 3 谐振腔的激发状态

Fig. 3 Oscillating micro-cavities

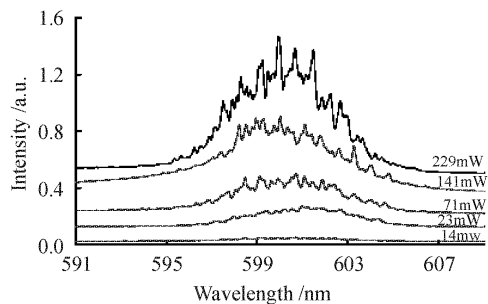


图 4 输出激光的光谱图

Fig. 4 Emission spectra measured

如果没有外界因素影响,且谐振腔由低损耗材料做成,光在腔内像传声廊一样不断反射,即可得到较高的品质因素  $Q$ 。

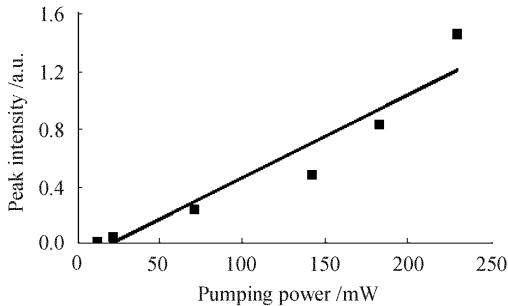


图 5 输出激光峰值强度与激励源功率的关系图  
Fig. 5 Emission peak intensity as a function of pumping power

#### 4 微谐振腔滤波器

光谐振器可用于可调滤波器,用来选择波分复用信号中的某一特定信道,而不影响其他信道<sup>[4]</sup>,因此在光通信中非常有用。通常情况下,由于器件的对称性,可以在波分复用的输出信号中增加某一特定波长的信号。这种谐振腔能高选择性地 100% 增强或减弱信号,而且能够实现非常紧凑的结构,因此是非常有实用意义的。用微腔谐振器做一个简单滤波器实验,实验装置示意图如图 6 所示。光纤总长 300 mm,为了减小损耗,其中 20 mm 被磨到可以看到芯,并便于连接到分光器上。

在此装置中,输入信号的一部分直接被传到输出 1,还有一部分通过谐振器被耦合到输出 2。图 7 是没有谐振腔(a)和有谐振腔(b)时输出 1 的对比。从中可以清楚地看出有谐振腔时,在 1505 nm 左右波长处的输出光波强度有一个明显的谷底,由能量守恒可知,这个波长的光波通过谐振腔耦合到了输出 2,可以证明这个谐振腔起到了滤波的作用。

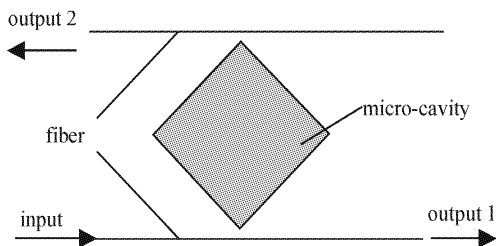


图 6 滤波实验装置示意图  
Fig. 6 Setup of micro-cavity-filter

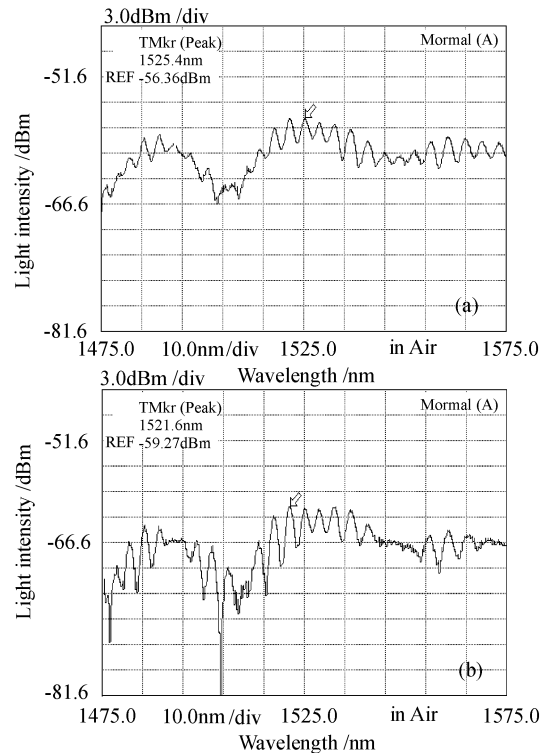


图 7 没有谐振腔(a)和有谐振腔(b)时输出 1 的光谱对比  
Fig. 7 Contrast of output 1 spectrum without (a) and with (b) micro-cavity

#### 5 结 论

利用 Si<110>晶面,通过刻蚀、浇铸等工艺制作了非常光滑的正方形微型谐振腔。经测定,硅模和浇铸得到的谐振腔均达到光学要求。利用激光染料若丹明 6G 掺杂的聚甲基丙烯酸甲脂(PMMA),在调 Q Nd:YAG 自倍频激光 532 nm 抽运下,得到 600 nm 波长的激光输出。这种谐振腔可应用于染料激光器 and 滤波器中。实验证明,这种构思巧妙的装置在激光和光通信方面有着很好的应用前景。

#### 参 考 文 献

- 1 B. E. Little, S. T. Chu, H. A. Haus *et al.*. Microring resonator channel dropping filters [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(6):998~1005
- 2 R. D. Meade, A. Devenyi, J. D. Joannopoulos *et al.*. Novel applications of photonic band gap materials; Low-loss bends and high Q cavities [J]. *J. Appl. Phys.*, 1994, **75**(9):4753~4755
- 3 M. Cai, G. Hunziker, K. Vahala. Fiber-optic add-drop device based on a silica microsphere-whispering gallery mode system [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1999, **11**(6):686~687
- 4 B. E. Little, J. S. Foresi, G. Steinmeyer *et al.*. Ultra-compact Si-SiO<sub>2</sub> microring resonator optical channel dropping filters [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1998, **10**(4):549~551