

## Analysis of High- $Q$ Optical Microtoroid Cavity by CO<sub>2</sub> Laser\*

JIA Pengfei, YAN Shubin\*, GUO Tao, LIU Jun, XIONG Jijun

(National Key Laboratory for Electronic Measurement Technology, Key Laboratory of Instrument Science & Dynamic Measurement North University of China, Ministry of Education, Taiyuan 030051, China)

**Abstract:** Recently high- $Q$  optical cavity has been widely researched. As the microcavity inherited the high optical quality and WG mode, it was popular in low threshold laser, electrodynamic (QED) experiments, nonlinear optics, as well as bio-chemical sensing. MEMS technology was used for manufacture microdisk cavity. We designed physical model and analyzed the temperature distribution theoretically. Furthermore, thermal stress of different microtoroids under CO<sub>2</sub> laser has been tested with Raman Spectral Analyzer. The results showed that the further the distance from the center of the cavity, the bigger the intermolecular tension is. Quality factor of the microtoroidal cavity was also tested by taper evanescent-field coupling. According to the testing results, the average value can be up to  $4.8 \times 10^5$  and the coupling efficiency is 95%.

**Key words:** optical cavity; quality factor; laser process; Raman frequency

EEACC: 4320L; 8530; 8540C

doi: 10.3969/j.issn.1004-1699.2011.03.029

## 高 $Q$ 平面环形微腔二氧化碳激光熔融分析\*

贾鹏飞, 闫树斌\*, 郭涛, 刘俊, 熊继军

(中北大学电子测试技术国防重点实验室, 仪器科学与动态测试教育部重点实验室, 太原 030051)

**摘要:** 高  $Q$  值的光学微腔, 近年来受到广泛的关注。由于其极高的品质因数和 WGM 模式, 被广泛应用于低阈值激光, 微腔量子动力学, 微腔生化传感器等领域。采用 MEMS 工艺制备平面微盘腔, 通过建立物理模型和温度场分析了微盘腔在激光下的温度分布情况, 通过拉曼频移测试了环形腔的热应力。实验结果表明激光处理表面后的微环腔应力为张力, 而且距离环中心越远应力越大, 最后测试得到微腔品质因数为  $4.8 \times 10^5$ , 耦合效率在 95% 以上。

**关键词:** 光学微腔; 品质因素; 激光处理; 拉曼频移

中图分类号: TN302

文献标识码: A

文章编号: 1004-1699(2011)03-0463-04

基于回音壁模式 (Whispering Gallery Mode, 简称 WGM<sup>[1]</sup>) 的光学微腔成为了近年来研究的热点。回音壁模式是指在介质微腔中光场由于表面的全反射在满足一定的条件下在腔中形成的稳定传播模式。绕行的光波满足一定相位匹配条件时, 可以相互叠加增强。在微腔外的光场为近场, 即局限于球表面附近的倏逝波。它是一种非传播波, 光场的振幅在矢径方向指数下降, 因此从腔体内透出到腔体外的平均能流为零, 这就使回廊模式下的微腔具有极高的品质因数和极小的模式体积。光学微腔在腔量子电动力学<sup>[2]</sup>、非线性光学<sup>[3]</sup>、低阈值激光器<sup>[4]</sup>、

生化传感器<sup>[5-6]</sup>等方面有很好的应用。

目前国内外研究微腔重点在于微腔集成制造工艺和实际应用性研究。其中主流微腔制造包括 MEMS 工艺, 激光加工工艺, 光学抛光工艺。国外一些研究机构通过光学抛光 CaF<sub>2</sub>, 使得微腔  $Q$  值超过  $10^{10}$ <sup>[7]</sup>。

本文介绍了 MEMS 工艺制备得到盘型腔, 通过建立微盘腔物理模型和表面温度场, 分析了经过二氧化碳激光扫描微盘后的温度分布和应力分布, 并进行了拉曼光谱应力测试。最后通过锥形光纤倏逝波耦合的方式检测了新型微环腔的光学性能。

**项目来源:** 国家 973 前期研究专项项目 (2009CB326206); 国家自然科学基金项目 (60707014, 60778029, 50975266); 重点实验室基金项目 (9140C1204040909); 总装创新项目 (7130907); 山西省自然科学基金项目 (200911059-16, 2010011003-2); 山西省高等学校优秀青年学术带头人项目

收稿日期: 2010-09-22 修改日期: 2010-11-30

# 1 制备以及实验

## 1.1 材料制备以及理论分析

通过 MEMS 工艺,首先以硅为衬底,在其上面用热氧化法、生长出 2 μm 的二氧化硅层。然后制备盘型掩模板、进行紫外线曝光;用 HF 刻蚀二氧化硅, XeF<sub>2</sub> 刻蚀出硅柱。工艺流程和最终刻蚀的结果如图 1、2 所示。

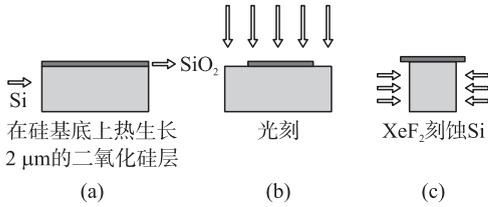


图 1 微盘腔制作工艺流程

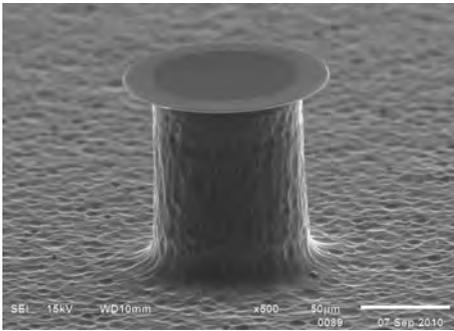


图 2 平面微盘腔的 SEM 图

## 1.2 温度场模型建立

如图 3 示:TEM<sub>00</sub> 二氧化碳激光垂直打在微盘表面,以微盘的直径在 120 μm,厚度为 2 μm 的二氧化硅层,底部为 100 μm 的硅柱为例子。根据热传导等式<sup>[8]</sup>有:

$$\rho c (\partial T / \partial t) = k [\partial^2 T / \partial x^2 + \partial^2 T / \partial y^2 + \partial^2 T / \partial z^2] + P(x, y, z, t) \quad (1)$$

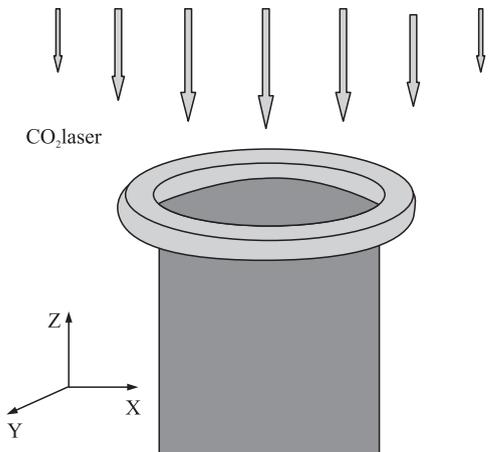


图 3 物理模型分析

其中  $c, \rho$  和  $k$  分别为材料比热容,材料的密度,热导

率; $P(x, y, z, t)$  为热源分布函数。微盘腔在没有受到激光照射时,初始条件为: $t=0, T(t)=T_0, T_0$  是微盘周围的环境温度,可以视为二氧化硅的初始温度。

根据能量守恒定律有:微盘表面从激光吸收的热量等于热传导向微盘内部传送热能和微盘表面向外界对流换热溢出热能和微盘向外界热辐射的热能。

即:

$$-k (\partial T / \partial z) + h (T_s - T_0) + B \varepsilon (T_s - T_0) = \alpha I(x, y, z, t) \quad (2)$$

其中二氧化硅与空气热对流边界条件:

$$-k (\partial T / \partial n) = \alpha \frac{P_0}{\pi R_0} \quad R \leq R_0 \quad (3)$$

$T_s$  为微盘表层加热区域温度,  $\alpha$  为微盘表面对激光功率的吸收率。  $R_0$  为激光束的半径。  $\partial T / \partial n$  指的是微盘温度沿边界面的法线偏导数。  $I(x, y, z, t)$  为激光的功率密度。  $\varepsilon$  为热辐射系数。  $B$  波尔兹曼常数,  $h$  为对流热交换系数。

激光辐射一般能被材料表面吸收,不存在体积热源。因此等式 1 中  $P(x, y, z, t) = 0$ , 在等式(2)中:

$$I(x, y, z, t) = (P_0 / \pi R_0) \times \exp(-x^2 / R_0^2) \delta(z) \quad (4)$$

$P_0$  为激光的功率。  $x$  是微盘的半径,  $\delta(z)$  是脉冲函数。求解以上方程组可以算出微盘腔某点在激光脉冲下的温度。根据以上分析,采用 Ansys 进行热分析,温度分布云图如下:

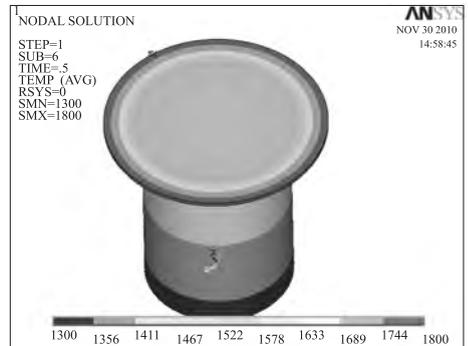


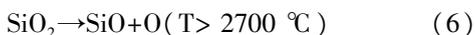
图 4 平面微盘腔 Ansys 热仿真

当二氧化硅受到激光照射时存在着瞬时的熔融和蒸发两种状态。熔融时二氧化硅为流体的黏度瞬时减小,微小的二氧化硅分子向曲率半径较小的地方流填充。温度变化是导致热应力产生根本原因,热应力与温差的关系<sup>[9]</sup>有:

$$\sigma_{\text{therm}} = E \beta \Delta T / (1 - \sigma) \quad (5)$$

$E$  为弹性模量;  $\beta$  为材料的膨胀系数;  $\sigma$  为泊松比。

当激光的功率过高时,蒸发代替熔融作用(大于 2 700 °C)<sup>[10]</sup> 此时二氧化硅发生如下化学反应:



通过熔融和蒸发这两种方式使得腔体表面更加平滑。硅的导热系数是二氧化硅的 100 倍<sup>[11]</sup>, 激光熔融表面抛光时, 对硅柱的影响小很多。

### 1.3 熔融加工光路

激光回流实验中需要特定的加工光路, 如示意图 2 所示: 我们使用的为 Coherent 公司的 k-500 型二氧化碳激光器, 波长为 10.6  $\mu\text{m}$ , TEM<sub>00</sub> 的高斯光束模式。对于不同半径的微盘来说需要不同的功率密度和时间。加工时通过改变激光的占空比和偏振片来调整激光的功率, 这是通过计算机来控制的。为了达到好的熔融效果, 我们采用多组汇聚镜来调整光斑大小, 使得光斑覆盖微盘。同样的, 样品被放在一个通过伺服电机可以控制的旋转平台上, 光斑的中心和微盘的中心重合, 这样激光加工时保证微盘边缘受热均匀。实验中我们测试得典型的加工功率为 100 MW/m<sup>2</sup>, 对于 80  $\mu\text{m}$  的微盘, 合适的光斑大约为 100  $\mu\text{m}$ 。加工后的微环腔如图 5。

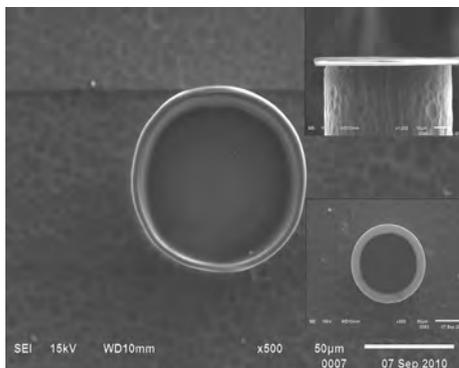


图 5 SEM 电镜下环形微腔图片, 右上方插图为环腔侧视图, 右下方插图为未经过激光熔融的微盘腔

## 2 拉曼热应力分析

在 MEMS 加工过程中, 离子注入、氧化、退火、化学减薄都将会在在微结构中造成残余应力分布<sup>[12]</sup>, 晶体硅的残余应力会降低 MEMS 系统的使用寿命。分析硅微盘在受到二氧化碳激光照射下热应力对微盘的形成有重要的意义。利用 Renishaw 拉曼光谱分析仪对微腔的表面应力进行了分析: 采用波长 514.5 nm、Ar<sup>+</sup> 离子激光分别对微盘腔和经过激光照射的微环腔进行采点取样。其中对微环腔分别是在激光功率密度为 200、180、100、90、75 MW/m<sup>2</sup>, 离微环中心每隔 10  $\mu\text{m}$  下采样取点。如图 7 所示。

对于硅晶面(100)其相对频移和应力直接的关系可以表述如下<sup>[13]</sup>:

$$\Delta w = \frac{\lambda_3}{2w_0} = \frac{q(S_{11} + S_{12}) + pS_{12}}{2w_0} \sigma_{xx} \quad (7)$$

$\Delta w$  为拉曼频移量,  $S_{11} S_{12} S_{12}$  为硅的柔性张量,  $p, q$  为声子形变潜能,  $\sigma_{xx}$  为应力。硅晶体理论值的本征频率  $w_0 = 520 \text{ cm}^{-1}$ , 将其它参数代入(100)晶面可以得到关系方程:

$$\sigma_{xx} = -434 \Delta w \text{ (MPa)} \quad (8)$$

“+”表示应力为张力, “-”表示应力为压力。

在图 6(A) 中为微盘腔的拉曼频移,  $w = 521.083 \text{ cm}^{-1}$  而标准硅晶体为  $w^0 = 520 \text{ cm}^{-1}$  有频差产生。说明在 MEMS 工艺生产微盘腔过程中有残余应力。图 6(B) 显示的是微环腔下采点取样例图。图 6 对比显示出未经激光照射过的微盘腔与照射后微环腔纯正频差。说明经过激光照射后有应力。图 7 为不同激光功率密度下、每隔 10  $\mu\text{m}$  的的微环取样, 可以看出在不同功率照射下, 频移差量逐渐递增, 说明距离微环中心越远、张力越大, 且位于环处达到最大值。测试中还发现当激光功率密度为 90 ~ 100 MW/m<sup>2</sup> 时微环腔体结构比较完整。微环中心张应力为 224.812 MPa, 微环处为 639.282 MPa。实验结果表明逐渐递增的张力是微环腔的主要因素。

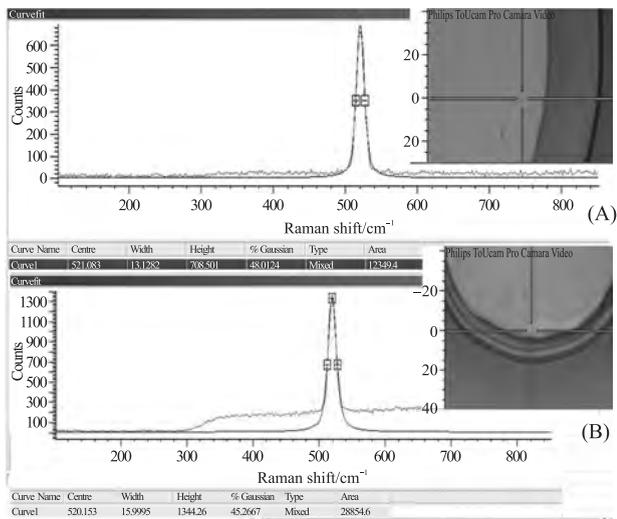


图 6 微盘腔和微环腔拉曼频移检测

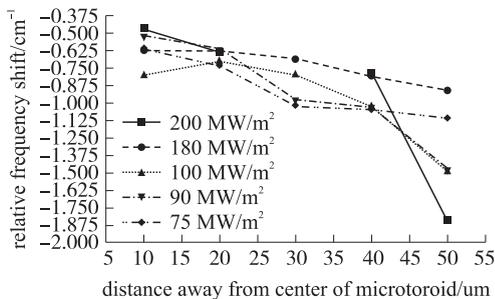


图 7 不同 CO<sub>2</sub> 激光功率下, 离微环中心每隔 10  $\mu\text{m}$  取点拉曼频移

## 3 Q 值测试

环形腔的品质因数测试我们采用锥形光纤耦合

方式。我们用的是 TLB-6300-LN 型激光器(窄线宽小于 300 kHz)。泵浦光波为 1 562.5 nm(中心频率为 192 THz),激光的输入功率小于 5  $\mu\text{w}$ 。采用(Tektronix AFG3022)波形发生器对激光器进行扫描,扫描频率 250 Hz,根据公式(9),线宽法测得微环腔品质因数为  $4.8 \times 10^5$  耦合效率达到 95% 以上。

$$Q = \frac{\nu}{\Delta\nu} \quad (9)$$

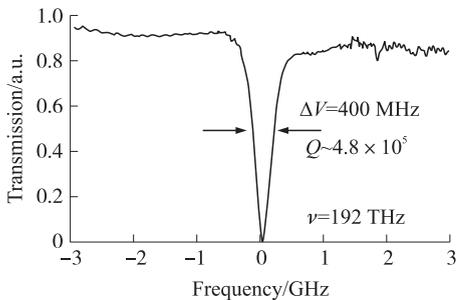


图 8 环形微腔耦合透射谱线

## 4 结论

平面环形微腔由于容易获得高 Q 值, MEMS 工艺便于集成的特点,使其具有广泛的应用前景。高 Q 光学微腔作为理想的研究平台,有可能在微光学谐振器陀螺,高灵敏生化传感器等领域取得突破性进展。品质因数直接影响了微腔的光学特性,实验证明通过分析微腔的受热模式,应力分布,对研究制备高品质微腔具有重要意义。

## 参考文献:

[1] Vahala K J. Optical Microcavities[J]. Nature,2003,424(1):839-846.

- [2] Spillane S M, Kippenberg T J, Vahala K J. Ultrahigh-Q Toroidal Microresonators for Cavity Quantum Electrodynamics[J]. Physical Review A,2005,71(013817):1-10.
- [3] Carmon T, Vahala K J. Visible Continuous Emission from a Silica Microphotonic Device by Third-Harmonic Generation[J]. Nature, 2007,3(1):430-435.
- [4] Spillane S M, Kippenberg T J, Vahala K J. Ultralow-Threshold Raman Laser Using a Spherical Dielectric Microcavity [J]. Nature, 2002, 415(1):621-623.
- [5] Armani A M, Kulkarni R P, Fraser S E, et al. Label-Free, Single-Molecule Detection with Optical Microcavities[J]. Science,2007, 317(5839):783-787.
- [6] Rijiravanich P, Aoki K, Chen J, et al. Micro-Cylinder Biosensors for Phenol and Catechol Based on Layer-By-Layer Immobilization of Tyrosinase on Latex Particles; Theory and Experiment[J]. Electroanalytical Chemistry,2006,589(1):249-258.
- [7] Kippenberg T J. Second-Harmonic Generation in Microresonators Through Natural Phase Matching[J] Physics 2010,32(3):153901-153904;
- [8] 郑启光. 激光先进制造技术[M]. 武汉:华中科技大学出版社,2002.
- [9] Triantafyllidis D. Dual Laser Beam Modification of High Alumina Ceramics[J]. Journal of Laser Applications,2003,15(1):49-54.
- [10] Mendez E M, Nowak K M, Baker H J, et al. Highly Localized CO<sub>2</sub> Laser Cleaning and Damage Repair of Silica Optical Surfaces[J]. Applied Optics. 2006,45(21):5358-5367.
- [11] McLachlan A D, Meyer F P. Temperature Dependence of the Extinction Coefficient of Fused Silica for CO<sub>2</sub> Laser Wavelengths[J]. Applied Optics. 1987,26(9):1728-1731.
- [12] De Wolf I Raman Spectroscopy: About Chips and Stress [J]. Spectroscopy Europe 2003,15(2)75:6-13
- [13] 桑胜波,薛晨阳,张文栋,等. 微加工工艺的拉曼在线测量[J]. 半导体学报,2006,27(6):1141-1145



贾鹏飞(1982-),男,硕士研究生,主要研究方向为 MEMS 惯性器件的设计,制造及测试等方面,jpf181@163.com;



闫树斌(1975-),男,博士,副教授,硕士生导师,清华大学出站博士后,山西省优秀青年学术带头人。主要研究方向为基于光学微腔的 MEMS 传感器,量子器件等,参加了国防 973,国家 863,国家自然科学基金等多项科研项目,shubin\_yan@nuc.edu.cn。