

面向陀螺应用的硅基大尺寸楔角型谐振腔

闫树斌, 马可贞, 李明慧, 郭泽彬, 骆亮, 张安富, 王任鑫, 薛晨阳

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

摘要: 针对集成光学陀螺中核心敏感单元难以同时实现集成化和高灵敏度问题, 提出了硅基二氧化硅楔角型谐振腔的制作方案。通过理论分析得出, 由光电探测器散弹噪声引起的陀螺极限灵敏度与谐振腔的直径和品质因数乘积($D \times Q$)成正比。运用 MEMS 工艺, 制作出直径达 1.5 cm、楔角 22° 的谐振腔; 通过控制氧化硅腐蚀时掩膜层的参数, 获得了不同楔角的谐振腔, 并论述了腐蚀楔角跟掩膜层参数的关系。通过耦合测试, 该谐振腔品质因数为 2×10^6 , 理论上采用上述谐振腔研制的陀螺, 其极限灵敏度可达 $6(^{\circ})/h$ 。

关键词: 大尺寸楔型腔; 集成光学; 陀螺灵敏度; 氧化硅腐蚀

中图分类号: TN214 文献标志码: A 文章编号: 1007-2276(2015)02-0747-05

Large dimension wedge-resonator on silicon chip for gyro application

Yan Shubin, Ma Kezhen, Li Minghui, Guo Zebin, Luo Liang, Zhang Anfu, Wang Renxin, Xue Chenyang

(Science and Technology on Electronic Test & Measurement Laboratory, Key Laboratory of Instrumentation Science and Dynamic Measurement Ministry of Education, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: For the problem that core sensitive unit of integrated optic gyro is difficult to realize integration and high sensitivity, a program of fabricating silica wedge-resonator was proposed. Through the theoretical analysis, the ultimate resolution of the gyro caused by the photo-detector shot noise was proportional to the product of the diameter and the quality factor of the resonant cavity. Wedge cavity of 1.5 cm diameter and 22° wedge angle was produced by MEMS(micro-electromechanical systems) process; resonant cavities with different wedge angles were acquired by controlling the mask layer parameters; the relationship between mask layer parameters and wedge angles quality was discussed. Through the coupling test, the quality factor of the resonator is 2×10^6 , the theoretical sensitivity of $6(^{\circ})/h$ is achieved for the gyroscope based on the resonator fabricated.

Key words: large dimension wedge-resonator; integrated optics; sensitivity of gyroscope;
silica corrosion

收稿日期: 2014-06-08; 修訂日期: 2014-07-10

基金项目: 国家自然科学基金(91123036, 61275166, 61178058)

作者简介: 闫树斌(1975-), 男, 副教授, 博士, 主要从事 MEMS 微腔的光 MEMS 传感器件、光纤传感、量子光学方面的研究。

Email: shubin_yan@nuc.edu.cn

0 引言

集成光学院陀螺因其体积小、集成度高，在卫星导航等方面有广泛应用^[1-3]。光学谐振腔是集成光学院陀螺的核心敏感部件，利用 MEMS 工艺制作出品质因数高且易于集成的谐振腔是集成光学院陀螺研究的重点。相对于掺杂氧化硅波导谐振腔^[4-6]和绝缘硅上微环谐振腔^[7]，硅基氧化硅楔型腔具有极高的品质因数^[8]并且易于集成^[9]，已被广泛应用于高性能光学器件，如布里渊激光器等^[10]，也为集成光学院陀螺的研究提供了参考。文中通过分析陀螺测试系统中由光探测器散弹噪声引起的极限分辨率跟谐振腔之间的关系，得出提高谐振腔的直径和品质因数乘积($D \times Q$)是提高陀螺极限灵敏度的关键，并以此进行了硅基大尺寸楔形腔的制备工艺研究。

1 基本原理

1.1 陀螺灵敏度分析

谐振式光学院陀螺是一种高精度的惯性角速度传感器^[11]，其基本工作原理是通过检测光学谐振腔在旋转过程中由 Sagnac 效应引起的两个方向的光的谐振频差，从而对旋转角速度进行测量。当谐振腔绕垂直于所在平面的轴以角速度 Ω 旋转时，根据 Sagnac 效应，腔内沿顺时针和逆时针方向的光将产生光程差 ΔL ，该光程差将引起一个正比于旋转角速度的谐振频差 Δf ^[11]，且可以表示为：

$$\Delta f = \frac{D}{n_{\text{eff}} \lambda} \Omega \quad (1)$$

式中： D 为谐振腔直径； n_{eff} 为谐振腔有效折射率； λ 为传输光的波长。根据公式(1)，只要测得谐振频差，就可以得到陀螺载体的旋转角速度，并且要获得较大的谐振频差，需要制备更大直径的谐振腔。

谐振型光学院陀螺测试系统中，由光探测器散弹噪声决定的陀螺极限分辨率^[11-12]为：

$$\delta \Omega \approx \frac{\lambda L}{4A} \frac{\sqrt{2} \partial_f}{\text{SNR}} \quad (2)$$

式中： L 为谐振腔周长； $A = \pi R^2$ 为谐振腔面积； ∂_f 为谐振腔响应谱线的半高全宽 (FWHM)，是测试系统信噪比：

$$\text{SNR} = \frac{i_s}{i_n} \sqrt{\frac{\eta \tau}{2hf}} \frac{P_o^{\max} - P_o^{\min}}{\sqrt{P_o^{\max}}} \quad (3)$$

式中： η 为探测器的量子效率； τ 为探测器响应时间； f 为传输光频率， P_o^{\max} 和 P_o^{\min} 分别为谐振腔输出光强最大值和最小值。

在近似估算时，有谐振腔品质因数 $Q \approx \frac{c}{\lambda \partial_f}$ ，公式(2)可简化为：

$$\delta \Omega \approx \frac{1}{DQ} \frac{\sqrt{2} c}{\text{SNR}} \quad (4)$$

图 1 给出腔直径分别为 0.75 cm、1.5 cm、3 cm、6 cm 时， Q 值跟陀螺极限分辨率的关系。可以看出，为使陀螺系统能获得小的极限分辨率，需要制作大尺寸、高 Q 值的光学谐振腔。

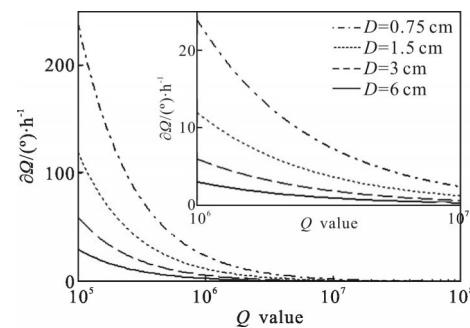


图 1 陀螺极限分辨率与谐振腔直径、 Q 值的关系

Fig. 1 Gyro resolution limit vs cavity diameter, Q value

1.2 谐振腔原理

光束在微纳米量级波导内以全反射形式传输时，波导表面会产生很强的倏逝场。当谐振腔靠近该波导并与之满足模式匹配关系时，波导内光场会以倏逝场形式耦合进谐振腔；当耦合光场在腔内绕行一周满足相移是 2π 的整数倍时，该光场在腔内发生谐振^[13]，此时光能被局限在谐振腔内，波导输出端探测光强会出现一个波谷。图 2 为楔型腔谐振原理示意图。

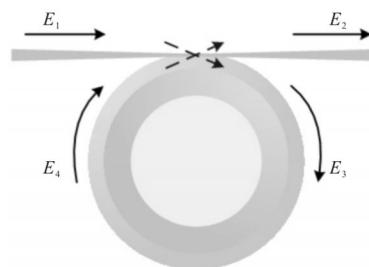


图 2 楔型腔谐振原理示意图

Fig. 2 Diagram of resonance principle

将边缘完好的楔型腔靠近拉锥后的光纤,就构成了一个最基本的谐振腔,如图2所示。用复数 E 表示传输光场,则光强 $P=|E|^2$ 。楔型谐振腔光场传输方程可以表示为:

$$\begin{cases} E_2 = \sqrt{1-k} \sqrt{1-\alpha_c} E_1 + i\sqrt{k} E_4 \\ E_3 = i\sqrt{k} E_1 + \sqrt{1-k} \sqrt{1-\alpha_c} E_4 \\ E_4 = \sqrt{1-\alpha_c L} E_3 e^{i\phi} \end{cases} \quad (5)$$

式中: k 为光纤与楔型腔间光强耦合系数; α_c 为耦合光强损耗系数,复数因子 $i=e^{\pi/2}$ 为光场因耦合而产生的 $\pi/2$ 相移; $\alpha_c L$ 为光强在腔内绕行一周的损耗; $\phi=\pi/2n_{\text{eff}}L/\lambda$ 为光场在腔内传输一周的相位变化量。

由公式(5)推导出楔型谐振腔传递函数为:

$$H = \left| \frac{E_2}{E_1} \right|^2 = \left| \frac{\sqrt{1-k} \sqrt{1-\alpha_c} - [1-(1-k)\alpha_c] \sqrt{1-\alpha_c L} e^{i\phi}}{1 - \sqrt{1-k} \sqrt{1-\alpha_c} \sqrt{1-\alpha_c L} e^{i\phi}} \right|^2 \quad (6)$$

令 $\Delta\lambda=\lambda-\lambda_0$, λ_0 是激光器输出光中心波长,对公式(6)用 Matlab 仿真可得图3所示谐振谱线。

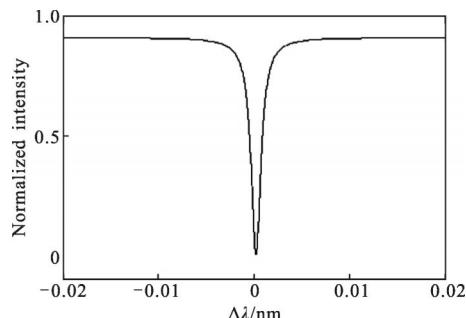


图3 谐振腔透射谱仿真图

Fig.3 Simulation diagram of transmission spectrum

2 楔形腔的制备

硅基氧化硅楔形腔制作工艺流程如图4所示。

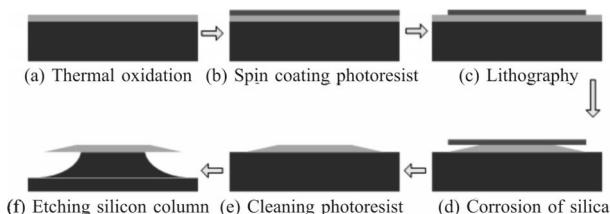


图4 楔形腔制作工艺流程

Fig.4 Fabrication process of wedge cavity

(1) 为使得到的谐振腔光学性能最优,采用热氧

化法在抛光硅片上生成致密且均匀的氧化硅层,厚度约为 $10\mu\text{m}$ 。

(2) 匀胶前要保证片子表面足够清洁。蒸涂粘附剂六甲基二硅胺(HMDS)使光刻胶更好地粘附于片子,避免漂胶。选择不同厚度和类型的光刻胶做掩膜,腐蚀后可以获得不同的楔角,见表1。

表1 不同光刻胶对应腐蚀楔角

Tab.1 Wedge angle corresponding to different photoresists

Photoresist type	Photoresist thickness/ μm	Wedge Angle/(°)
AZ6112	1.2	10
AZ5214	1.5/1.7/2	18/20/22
EPI612	2	43

(3) 根据不同胶厚选定合适的曝光时间、显影时间等。利用显微镜细致观察盘腔边缘线条,确保无任何瑕疵方能进行后续操作。需要注意的是,为提高光刻胶的稳固性,避免长时间腐蚀过程中漂胶,需要适当延长前、后烘的时间。

(4) 选用腐蚀速率较快且不易引起漂胶的 BOE 缓冲液($\text{NH}_4\text{F}: \text{HF}=5:1$)对氧化硅层进行腐蚀。常温条件下腐蚀 $10\mu\text{m}$ 厚的氧化硅大约需 130 min 。当氧化层即将腐蚀干净时,可观察到片子表面有色晕变化。

(5) 将片子表面的光刻胶清洗干净。

(6) 采用感应耦合等离子(ICP)刻蚀方法刻蚀硅柱,反应气体为纯 SF_6 , ICP 功率 2000 W , 射频(RF)功率 10 W , 所得硅柱高度为 $150\sim200\mu\text{m}$ 。

楔角度数的不同对谐振腔品质因数有一定影响^[8],文中通过控制掩膜层参数,制备了几种不同角度的楔型腔。研究发现:腐蚀形成的腔边缘角度大小不仅与掩膜层厚度有关,还与掩膜层边缘形貌有关,如表1所示,其中 AZ6112 胶的边缘是渐渐变薄的,EPI612 胶边缘陡直度最好。不同光刻胶边缘陡直度越好的腐蚀所得楔角越大,同种光刻胶旋涂越厚的所得楔角度数越大,所以小范围内角度改变可以通过调节转速、旋涂不同厚度的光刻胶来实现,大范围改变角度需要采用不同类型的光刻胶。

实验样品如图 5 所示。图(a)为直径 1.5cm 腔实物图;图(b)为直径 2mm 腔 SEM 图;图(c)、(d)为盘腔楔形边缘。

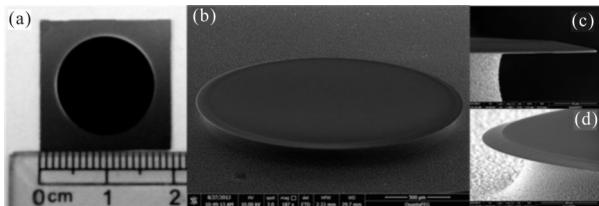


图 5 楔形腔样品图

Fig.5 Wedge cavity samples

3 耦合测试实验

为了测试所得楔型腔的品质因数,设计并搭建了如图 6 所示的实验系统。其中,激光光源为半导体可调谐激光器 New Focus Model 6300-LN, 波长范围为 1 520~1 570 nm, 线宽小于 300 kHz, 扫频系数为 10 GHz/V; 信号发生器为斯坦福 Model DS345; 光电探测器为 New Focus Model 1 811, 带宽为 125 MHz, 最大输入光功率为 7 mW; 耦合测试光纤采用 SMF-28 单模光纤, 剥去包层后用拉锥机 FBT-200 拉成锥腰直径 1~5 μm 的锥形光纤。

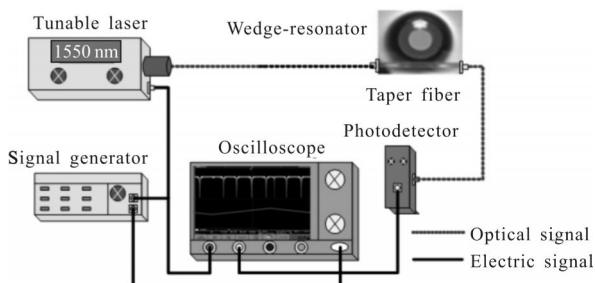


图 6 楔型腔耦合测试系统

Fig.6 Wedge-cavity coupling test system

实验中,激光器中心波长设置为 1 550 nm, 同时使用信号发生器产生三角波对其进行频率调制, 调制信号频率为 50 Hz, 峰-峰值为 1 V。通过高精度三维调节架调节锥形光纤与楔型腔相对位置, 得到锥型光纤与楔型腔处于耦合状态时的最佳谐振曲线, 如图 7 所示。

通过数据分析, 谐振腔透射谱线半高全宽约 0.8 pm, Q 值约 2×10^6 。根据公式(4), 文中所制作的直径 1.5 cm 的楔形腔, 用于陀螺系统, 灵敏度可达

6 ($^\circ$)/h。随着工艺的进一步优化和完善, 微腔品质因数将达 10^8 , 相应陀螺系统的灵敏度有望提高两个数量级, 其应用领域也将拓宽。

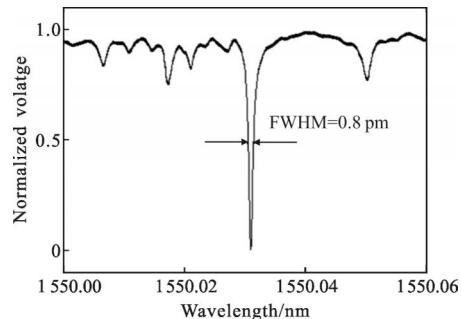


图 7 楔型腔耦合测试谱线

Fig.7 Coupling test spectrum of wedge-resonator

4 结 论

文中设计并制作的硅基二氧化硅楔型腔, 兼具品质因数高和大尺寸的特性, 应用于集成光学陀螺核心敏感单元, 不仅可以解决集成化、批量化问题, 在提高集成光学陀螺极限灵敏度方面, 也具有极大发展潜力和研究价值。随着国内 MEMS 工艺水平的发展, 能制作出尺寸更大、品质因数更高的楔型谐振腔, 也会为集成光学陀螺的研究提供重要参考价值。

参 考 文 献:

- [1] Baiborodin Y V. Integrated optical passive ring resonator for optical gyroscopes [J]. *Soviet Journal of Quantum Electronics*, 1992, 22(2): 176–177.
- [2] Yan Shubin, Zhao Min, Liu Zheng, et al. All -solid integrated optical waveguide gyro [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(5): 921–925. (in Chinese)
闫树斌, 赵敏, 刘正, 等. 芯片级全固化集成光波导陀螺 [J]. 红外与激光工程, 2011, 40(5): 921–925.
- [3] Yu Huaiyong, Zhang Chunxi, Feng Lishuang, et al. Optical noise analysis in dual-resonator structural micro-optic gyro [J]. *Chinese Physical Letter*, 2011, 28(8): 084203–(1–4).
- [4] Kominato T. Ring resonator composed of GeO₂-doped silica waveguides [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1992, 10(12): 1781–1787.
- [5] Ma Huilian, Jin Zhonghe, Ding Chun, et al. Optimal design of ring resonator in Silica optical waveguide [J]. *Chinese Journal of Laser*, 2005, 32(10): 1330–1332. (in Chinese)
马慧莲, 金仲和, 丁纯, 等. 二氧化硅光波导环形谐振腔 [J]. 中国激光, 2005, 32(10): 1330–1332.

- [6] Yu Huaiyong, Zhang Chunxi, Feng Lishaung, et al. Modeling of polarization noise in silicon integrated optical resonance gyroscope and performance analysis [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 45(5): 1287–1293. (in Chinese)
于怀勇, 张春熹, 冯丽爽, 等. 谐振式硅基集成光学陀螺的偏振噪声建模与分析[J]. 红外与激光工程, 2012, 45(5): 1287–1293.
- [7] Wim Bogaerts, Peter De Heyn, Thomas Van Vaerenbergh, et al. Silicon microring resonators [J]. *Laser and Photonics Reviews*, 2012, 6(1): 47–73.
- [8] Hansuek Lee, Tong Chen, Jiang Li, et al. Chemically etched ultrahigh-Q wedge-resonator on a silicon chip [J]. *Nature Photonics*, 2012, 6: 369–373.
- [9] Fernando Ramiro-Manzano, Nikola Prtljaga, Lorenzo Pavesi, et al. A fully integrated high-Q Whispering-Gallery Wedge Resonator[J]. *Optics Express*, 2012, 20(20): 22934–22942.
- [10] Jiang Li, Hansuek Lee, Tong Chen, et al. Characterization of a high coherence, Brillouin microcavity laser on silicon [J]. *Optics Express*, 2012, 20(18): 20170–20180.
- [11] Chow W W, Gea-Banacloche J, Pedrotti L M. The ring laser gyro[J]. *Reviews of Modern Physics*, 1985, 57(1): 61–104.
- [12] David M. Shupe. Fiber resonator gyroscope: sensitivity and thermal nonreciprocity [J]. *Applied Optics*, 1981, 20 (2): 286–289.
- [13] Liu Ping. Study on the Characteristics of Fiber Optic Resonator Ring for Resonant Fiber Optic Gyroscope [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2008: 7–10. (in Chinese)
刘平. 谐振式光纤陀螺环形谐振器的特性研究 [D]. 长春: 长春理工大学, 2008: 7–10.