

面向谐振式微光学陀螺应用的球形谐振腔 DQ 乘积优化*

刘建华 唐军 商成龙 张伟 毕钰 翟陈婷 郭泽彬 王明焕 郭浩
钱坤 刘俊† 薛晨阳

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

(2014年11月25日收到; 2015年2月16日收到修改稿)

基于谐振式光学陀螺高灵敏度、低成本与微型化的发展需求, 为了实现高灵敏度的谐振式微光机电陀螺, 提出了以集成光学微谐振腔领域里高 Q 值、大直径谐振腔的制作为目标, 应用方向为谐振式光学陀螺的球形光学微谐振腔核心敏感单元. 在实验中以氢火焰作为热源采用熔融法制备球形光学微谐振腔. 通过调节氢气的流量控制氢火焰热源面积, 制备了不同直径(300—2200 μm)的球形谐振腔, 分析了球形谐振腔 Q 值、 DQ 乘积、陀螺灵敏度与谐振腔直径 D 的对应关系及其原因, 获得了最优参数的面向谐振式光学陀螺的球形谐振腔敏感单元. $D = 1260 \mu\text{m}$ 时, 球腔品质因数 $Q = 7.18 \times 10^7$, 得到的最优陀螺灵敏度约为 $10^\circ/\text{h}$, 满足商业级应用的需求, 为芯片级、高精度、低成本的新型谐振式光学微腔陀螺的研究奠定了实验基础.

关键词: 球形谐振腔, DQ 乘积, 灵敏度, 微光学陀螺

PACS: 42.60.Da, 42.81.Pa, 78.20.-e

DOI: 10.7498/aps.64.154206

1 引言

陀螺仪作为一种测量载体姿态角度与旋转角速度的重要惯性敏感器件, 是构成惯性导航系统的基础核心器件, 其在航海、航空、航天、军事等领域中广泛使用, 它的发展对一个国家的工业、国防和其他高科技的发展有着十分重要的战略意义^[1–3]. 陀螺的发展经历了机械陀螺、激光陀螺与光纤陀螺等阶段, 如今发展最为成熟的是干涉式光纤陀螺, 在很多领域已取代了传统的机械式陀螺仪. 依据陀螺仪微型化发展的要求, 具有更小体积、更高动态范围和理论精度的谐振式光纤陀螺具有更高的研究价值并成为新一代惯性传感器的代表^[4]. 目前, 谐振式光纤陀螺仍处于由实验室向实用化过渡的阶段.

以谐振腔作为核心敏感元件的谐振式光学陀

螺系统, 其极限灵敏度主要取决于谐振腔直径 D 与品质因数 Q 的乘积^[5]. Ciminelli课题组通过 DQ 乘积的优化设计, 制备了大直径高品质因数的磷化铟环形谐振腔, 在测量参量为通常值下其对应的谐振式光学陀螺极限灵敏度达到了 $54^\circ/\text{h}$ ^[6]. 而球形光学微谐振腔具有高 Q 值、高分辨率、制备简单易行且易于封装集成等诸多的优势^[7]. 以球形谐振腔为核心敏感单元的谐振式光学陀螺理论上可以达到更高的灵敏度, 并且其陀螺效应已经得到了验证^[8]. 为了进一步提高谐振式光学陀螺的极限灵敏度, 需要对球形谐振腔 DQ 乘积进行优化研究, 以获得最优参数的球形谐振腔敏感单元.

本文制备了不同直径(300—2200 μm)的球形谐振腔, 对其进行了性能测试, 并对测试结果进行计算处理. 分析球形谐振腔 Q 值、 DQ 乘积、陀螺灵敏度与谐振腔直径 D 的对应关系及其原因, 获

* 国家自然科学基金杰出青年科学基金(批准号: 51225504)、国家自然科学基金重点项目(批准号: 91123036)和山西省高等学校优秀青年学术带头人支持计划资助的课题.

† 通信作者. E-mail: liuj@nuc.edu.cn

得最优参数的面向谐振式光学陀螺的球形谐振腔敏感单元. 随着谐振腔直径 D 的增大谐振腔 Q 值、 DQ 乘积先升高后降低, 陀螺灵敏度先升高后下降. 当球形谐振腔直径 $600\ \mu\text{m} < D < 2000\ \mu\text{m}$ 时, 其陀螺灵敏度皆能满足 $\delta\Omega < 30^\circ/\text{h}$ 条件, 达到战术级水平. $D = 1260\ \mu\text{m}$ 时, 球腔品质因数 $Q = 7.18 \times 10^7$, 得到最优陀螺灵敏度为 $11.54^\circ/\text{h}$, 满足商业级应用的需求, 为芯片级、低成本的新型谐振式光学微腔陀螺的研究奠定了实验基础.

2 基本原理

2.1 光学微谐振腔角速度传感原理

以高 Q 值光学微谐振腔为敏感单元的角速度传感系统, 其基本原理是 Sagnac 效应^[9–11]. 基于微谐振腔自身的光波谐振频率敏感特性, 拟通过检测旋转所引起的微谐振腔顺逆时针两方向谐振频差的方式实现角速度测试. 对于基本的微谐振腔角速度传感系统, 该谐振频差信号可表达为

$$\Delta f = \frac{4A}{n\lambda L} \Omega = \frac{D}{n\lambda} \Omega, \quad (1)$$

其中, D 为谐振腔的直径, $D/n\lambda$ 为角速度传感系统的标度因子. 从 (1) 式可知, 系统的谐振频率差与旋转角速度成正比. 因此, 只要检测出谐振频率差就可以得到系统的旋转角速率信息. 而当腔体材料的折射率 n 和波长 λ 确定后, 为实现较大频差以利于检测陀螺输出信号, 理论上只能从提高谐振腔的直径入手.

2.2 谐振式光学陀螺极限灵敏度分析

在以光学谐振腔为核心敏感部件, Sagnac 效应为机理的谐振式光学谐振陀螺中, 谐振腔品质因数 Q 和腔体直径 D 决定了谐振式光学谐振陀螺的极限灵敏度. 这两个性能参数与谐振式光学陀螺极限灵敏度关系公式为^[12]

$$\delta\Omega = \frac{\sqrt{2}c}{DQ} \sqrt{\frac{Bh\nu_0}{\eta_{\text{pd}}P_{\text{pd}}}} \left(\frac{3600 \times 180}{\pi} \right) ((^\circ)/\text{h}). \quad (2)$$

式中, P_{pd} 为探测器读出光功率; B 为测试带宽; ν_0 为光谐振频率; η_{pd} 为探测器光电转换效率; c 为光速; h 为普朗克常数; D 为谐振腔直径; Q 为谐振腔品质因数. 对于确定的测试条件, 当 Q 值和谐振腔半径 D 足够大时, 陀螺能获得较高的灵敏度.

图 1 显示了谐振式光学陀螺极限灵敏度 $\delta\Omega$ 与品质因数 Q 和腔体直径 D 之间的关系. 计算所用各项参数取通常值为 $B = 1\ \text{Hz}$, $\eta_{\text{pd}} = 0.9$, $P_{\text{pd}} = 1\ \text{mW}$, $\nu_0 = 193\ \text{THz}$ (对应于工作波长 $1550\ \text{nm}$). 分析可知, 陀螺极限灵敏度的改善需要通过综合提高品质因数 Q 和腔体直径 D 来实现, 如若想达到 $\delta\Omega < 100^\circ/\text{h}$ 的高灵敏度, 则谐振式光学陀螺所使用的微谐振腔在品质因数 $Q > 10^7$ 的同时腔体直径需要满足条件 $D > 1000\ \mu\text{m}$.

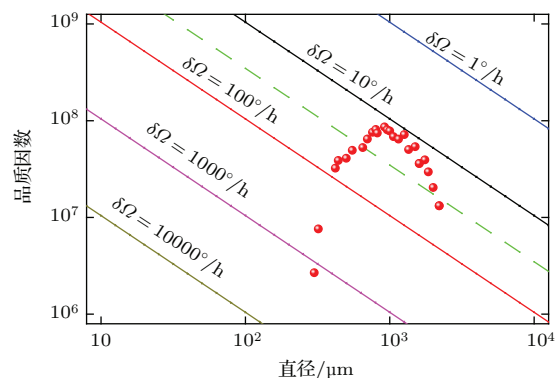


图 1 (网刊彩色) 陀螺灵敏度与直径和品质因数的仿真关系 (横纵轴皆为对数标度, 圆点为实验制备球腔的极限灵敏度分布)

Fig. 1. (color online) Gyro resolution dependence on D and Q in terms of level curves. Log scale has been used for both axes. Fabricated microspheres' limited resolutions are marked by red dots.

由以上分析可知, 谐振腔单元做为谐振式光学陀螺的核心敏感部件, 其品质因数 Q 和腔体直径 D 对实现谐振腔角速度传感的性能有直接影响. 因此, 需制备高 Q 值、大直径的光学谐振腔, 以实现高灵敏度的谐振式光学陀螺.

2.3 Q 值与球腔直径理论关系

球形谐振腔品质因数 Q 由辐射损失、材料损耗、和表面散射几个因素决定:

$$Q^{-1} = Q_{\text{辐射}}^{-1} + Q_{\text{吸收}}^{-1} + Q_{\text{散射}}^{-1}, \quad (3)$$

其中, $Q_{\text{辐射}}$ 表征有限的 D/λ 比率而导致的光能量损失, 指由光学微谐振腔的表面弯曲导致的辐射能量损耗. 球形谐振腔的 $Q_{\text{辐射}}$ 近似表达式为

$$Q_{\text{辐射}} = \frac{1}{2} \left(l + \frac{1}{2} \right) n_{\text{eff}}^{-(1-2b)} \times (n_{\text{eff}}^2 - 1)^{1/2} e^{2T_l}, \quad (4)$$

式中,

$$T_l = \left(l + \frac{1}{2} \right) (\eta_l - \tanh \eta_l), \quad (5)$$

$$\eta_l = \arccos h \left\{ n_{\text{eff}} \left[1 - \frac{1}{l + 1/2} \right. \right. \\ \left. \left. \times \left(t_{\text{ps}}^0 \xi + \frac{l^{1-2b}}{\sqrt{l^2 - 1}} \right) \right]^{-1} \right\}, \quad (6)$$

$$\xi = \left[\frac{1}{2} \left(l + \frac{1}{2} \right) \right]^{1/3}, \\ b = \{1(\text{TM}), 0(\text{TE})\}, \quad (7)$$

其中 $l = n_{\text{eff}} \pi D / \lambda$, n_{eff} 为球腔有效折射率, λ 为谐振波长. 微球腔采用熔融单模光纤制备, 可近似认为是纯二氧化硅, 1550 nm 处的材料折射率为 1.444. 球腔内 WGM 模式的有效折射率 n_{eff} 与 WGM 模式的分布和阶数有关, 其值可以通过 WGM 模式位置进行计算, 基模下 ($q = 1$), 直径 100 μm 、材料折射率 1.444 的球腔在 1550 nm 处 TE(TM) 模式的有效折射率约为 1.408(1.406)^[13]. 由 (7) 式可知 $Q_{\text{辐射}}$ 在 TE 和 TM 两个偏振态间有所不同, 且 TE 偏振模式的 $Q_{\text{辐射}}$ 比 TM 偏振模式略高.

$Q_{\text{吸收}}$ 表征微谐振腔自身材料对谐振光能量内部吸收而导致的光能量损耗. 腔体材料的吸收系数较小时, 有如下的关系^[14]:

$$Q_{\text{吸收}} \approx \frac{2\pi n_{\text{eff}}}{\alpha \lambda}, \quad (8)$$

其中 n_{eff} 为球腔有效折射率, α 为材料吸收系数, λ 为谐振波长. 取 $n_{\text{eff}} = 1.408$, $\lambda = 1550$ nm, 得到 $Q_{\text{吸收}}$ 与材料吸收系数 α 的理论关系如图 2(a) 所示.

$Q_{\text{散射}}$ 表征由于微谐振腔表面粗糙度导致的表面射能量损耗^[15], 可通过下式估计:

$$Q_{\text{散射}} \approx \frac{3\lambda^2 l^{10/3}}{16\pi^5 \sigma^2 n_{\text{eff}}^2 q^{5/2}}, \quad (9)$$

其中 $l = n_{\text{eff}} \pi D / \lambda$, n_{eff} 为球腔有效折射率, λ 为谐振波长, σ 为腔体表面粗糙度, q 为共振模阶数. 取 $n_{\text{eff}} = 1.408$, $\lambda = 1550$ nm, $\sigma = 50$ nm, $q = 1$, 得到 $Q_{\text{散射}}$ 与腔体直径 D 的理论关系如图 2(b) 所示; 取 $n_{\text{eff}} = 1.408$, $\lambda = 1550$ nm, $D = 100$ μm , $q = 1$, 得到 $Q_{\text{散射}}$ 与表面粗糙度 σ 的理论关系如图 2(c) 所示.

通过 (4)—(7) 式可知 $Q_{\text{辐射}}$ 与直径 D 之间是一种近指数增长的关系, 这决定了当直径大于一定值时便可忽略 $Q_{\text{辐射}}$ 对 Q 的影响. 当 $D/\lambda > 15$ 时, $Q_{\text{辐射}} > 10^{11}$. 此时, Q 主要由 $Q_{\text{吸收}}$ 与 $Q_{\text{散射}}$ 决定. 制备球形谐振腔所使用的氧化硅材料在 $\lambda = 1550$ nm 处吸收系数 $\alpha \approx 0.2$ dB/km, 取 $n_{\text{eff}} = 1.408$,

通过 (8) 式可得出在 $\lambda = 1550$ nm 时, $Q_{\text{吸收}}$ 约为 3×10^1 . 可见, 当球形谐振腔直径较大且腔体纯净吸收系数较小的情况下, $Q_{\text{辐射}}$ 与对 Q 的影响可以忽略, 品质因数 Q 主要由 $Q_{\text{散射}}$ 所, 即 $Q \approx Q_{\text{散射}}$.

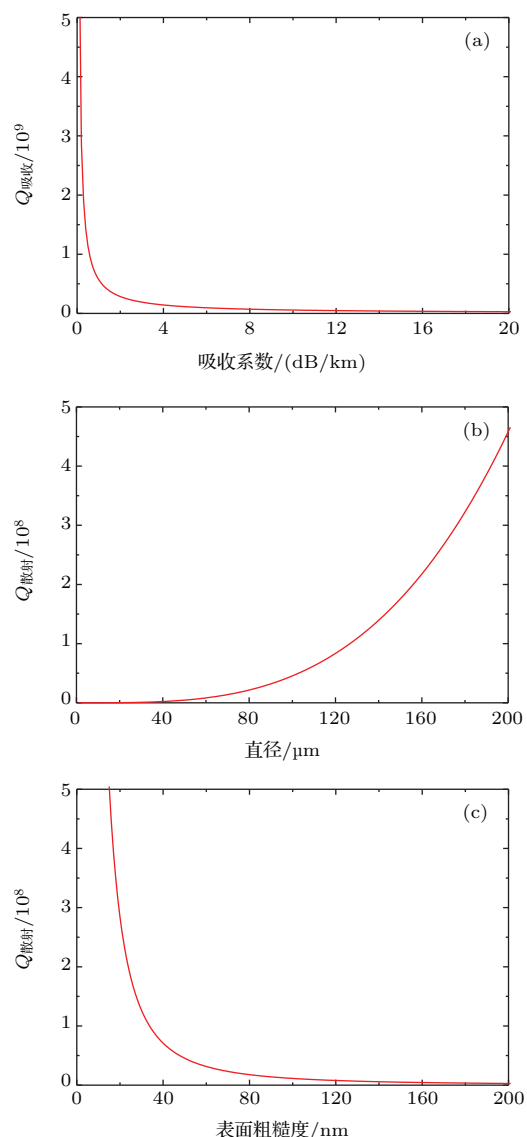


图 2 (网刊彩色) (a) $Q_{\text{吸收}}$ 与吸收系数 α 的关系; (b) $Q_{\text{散射}}$ 与直径 D 的关系; (c) $Q_{\text{散射}}$ 与表面粗糙度 σ 的关系

Fig. 2. (color online) (a) Q_{abs} versus absorption coefficient α ; (b) Q_{sca} versus diameter D ; (c) Q_{sca} versus surface roughness σ .

3 制备与测试

3.1 球腔制备

采用熔融法对氧化硅球形微谐振腔进行制备, 即以高温热源将去掉涂覆层光纤的一端局部融化, 依赖熔融状态氧化硅的表面张力形成表面光滑的球形微谐振腔. 制备材料为 Corning 公司 SMF-28

单模光纤, 在现有的单模光纤中, 其在 1550 nm 波段拥有最低的传输损耗, 是制备高 Q 值球形微谐振腔的良好原材料。

应用熔融法制备球形微谐振腔所应用的热源可根据实际需要选择。常用的热源有氢火焰、电火花和 CO_2 激光三种。 CO_2 激光热源所制备的球形微谐振腔尺寸较小 ($D < 50 \mu\text{m}$), 氢火焰、电

火花热源面积较大, 可以用来制备尺寸相对大的微球。采用氢火焰作为热源制备表面光滑的光学球形微谐振腔, 氢火焰热源面积可以通过对氢气流量的调节进行控制, 对氢火焰热源面积进行控制实现了不同直径 (300—2200 μm) 球形谐振腔的, 所制备球形谐振腔的 CCD 显微图像如图 3 所示。

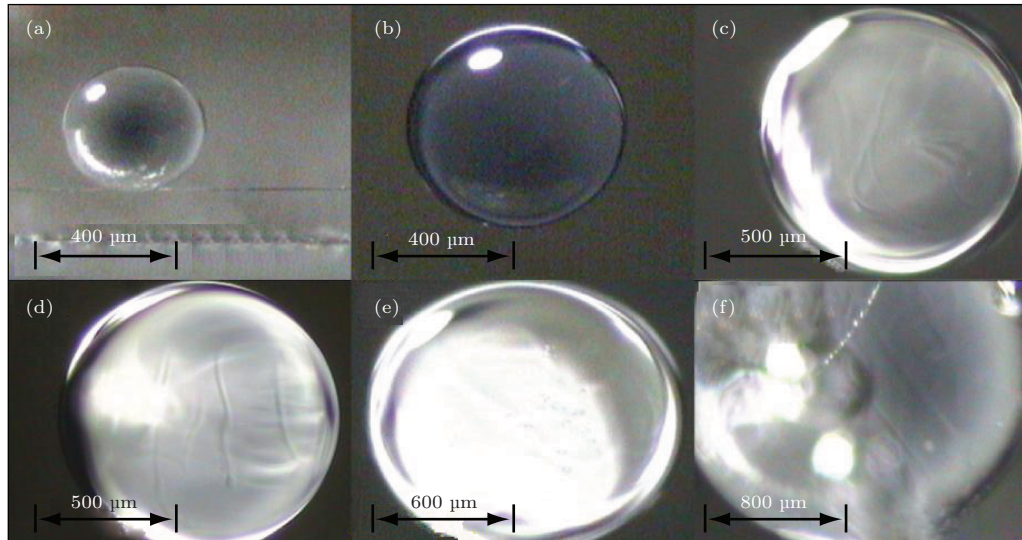


图3 (网刊彩色) 不同直径的谐振腔 (a) 420 μm ; (b) 650 μm ; (c) 960 μm ; (d) 1150 μm ; (e) 1600 μm ; (f) 2200 μm

Fig. 3. (color online) microspheres with different diameters: (a) 420 μm ; (b) 650 μm ; (c) 960 μm ; (d) 1150 μm ; (e) 1600 μm ; (f) 2200 μm .

3.2 测试与分析

采用锥形光纤与球型谐振腔进行耦合的方式进行测试, 锥形光纤采用单模光纤熔融拉锥法制备^[16,17], 通过调整拉锥长度可对其腰椎直径在

1—3 μm 范围内进行控制。所测试的球形谐振腔直径较大, 依据锥形光纤与谐振腔谐振模式的传输常数相匹配条件^[18], 选用腰椎直径 3 μm 的锥形光纤, 来构建高耦合效率的光学微谐振腔耦合结构。

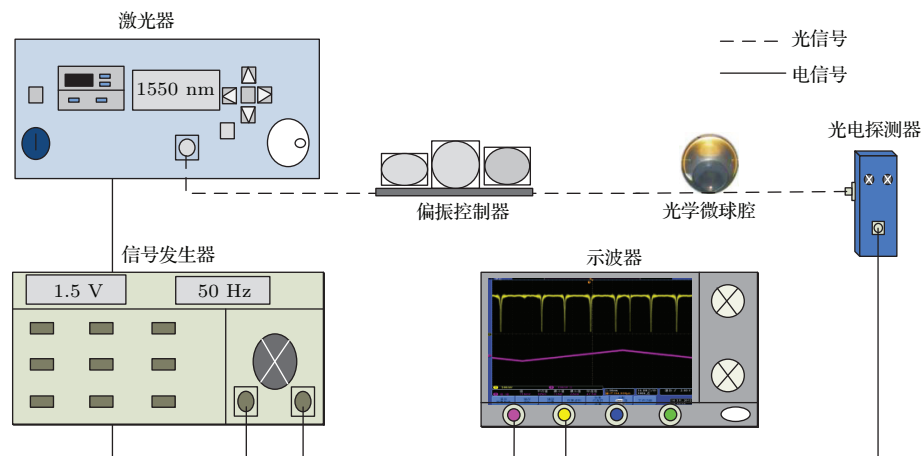


图4 (网刊彩色) 测试系统示意图

Fig. 4. (color online) Diagram of the experimental setup.

测试中, 微球附近锥形光纤的存在将会影响其WGM模式, 锥形光纤横向运动将影响测量结果^[19]. 实验期间很难避免衬底机械扰动和周围空气的流动来保持光纤锥的稳定. 因此, 我们将锥形光纤与微球接触形成一个稳定的测量条件. 测试装置如图4所示, 使用波长可调节范围在1520 nm到1570 nm的Velocity6328半导体可调谐激光器作为光源, 信号发生器对激光器进行外部调制. 调制电压1.5 V, 调制频率50 Hz. 实验所用光源类型为体材料半导体激光器, 这类体材料半导体激光器的激光通常以TE模偏振输出. 在工作电流不高的情况下, TE模和TM模在激光器谐振腔内共存, 展开竞争. 随着工作电流不断的增加, TE模的增益逐渐增强而TM模的增益逐渐减弱, 经过模式竞争TE模形成稳定振荡, 激光器以TE模偏振输出. 在实验测试中所使用的锥形光纤采用单模光纤熔融拉锥法制备, 由于单模光纤固有双折射率受环境影响严重, 导致偏振态随环境波动比较严重. 使用三环型

机械式光纤偏振控制器对输出的偏振态进行调整, 使用高精度三位调节架调节耦合状态, 高倍CCD进行调节观测, 测试中尽量降低环境噪声对测试结果的影响.

通过测试发现在TE模式下球腔品质因数与耦合效率较TM模式下高, 耦合效果更为理想. 以直径 $D = 1000 \mu\text{m}$ 的微球腔为例, 测试得到了其谐振谱线如图5所示. TE与TM模式下谐振谱线的洛伦兹拟合曲线如图5(b), (c), 其谐振谱线宽分别约为2.47 MHz与3.99 MHz, 对应品质因数 $Q_{\text{TE}} \approx 7.83 \times 10^7$, $Q_{\text{TM}} \approx 4.84 \times 10^7$. 此外, TE模式下锥形光纤与球腔的耦合效率为96%, TM模式下锥形光纤与球腔的耦合效率为82%. 高 Q 值与高耦合效率有利于提高谐振式光学陀螺检测精度, 因此在实际检测中对球腔的TE模式谐振点进行锁定来实现微小频差的检测以及角速度传感. 对不同直径的微球腔分别进行品质因数 Q 的测试, 其测试结果如表1所示.

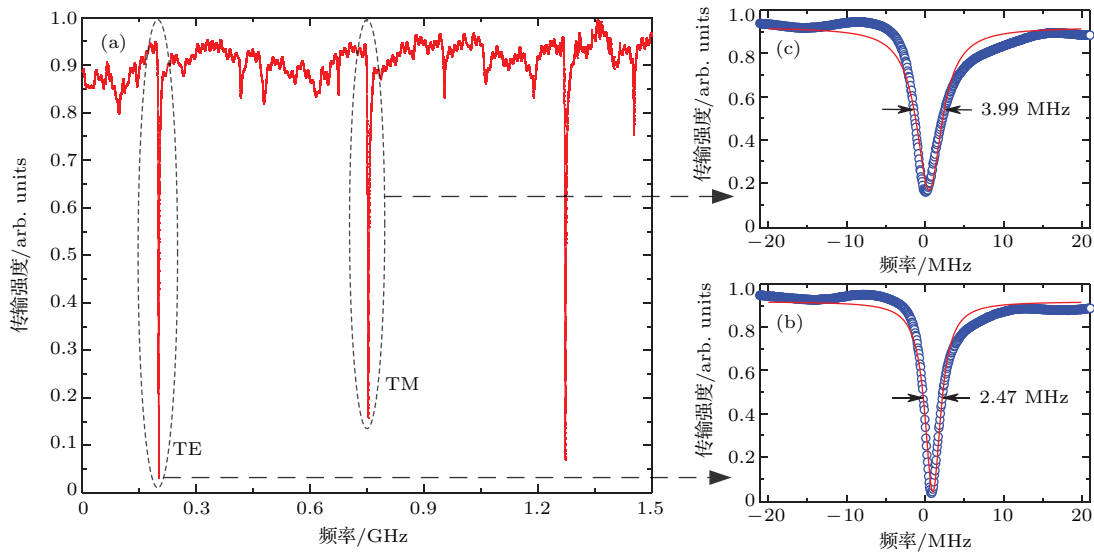


图5 (网刊彩色) (a) 在1.5 GHz扫描范围内获得的谐振谱线; (b) TE模式洛伦兹拟合曲线; (c) TM模式洛伦兹拟合曲线

Fig. 5. (color online) (a) Representative transmission spectrum with 1.5 GHz frequency range; (b) TE modes with Lorentzian fits to the data; (c) TM modes with Lorentzian fits to the data.

表1 不同直径 D 微球腔及其对应品质因数 Q

Table 1. Diameters of microsphere cavity and the corresponding quality factor values.

$D/\mu\text{m}$	300	320	420	440	500	550	650	700	760	800	820	920
$Q/10^7$	0.27	0.76	3.23	3.88	4.08	4.94	5.27	6.46	4.59	8.52	6.45	9.23
$D/\mu\text{m}$	960	1000	1060	1150	1260	1350	1500	1600	1750	1850	2000	2200
$Q/10^7$	8.04	7.83	4.84	6.46	7.18	4.04	5.38	3.61	3.94	2.96	2.04	1.32

不同直径微球腔 Q 值与 DQ 乘积随直径 D 的变化规律如图 5 所示(实线为多项式拟合曲线), 可以看出当球腔直径 $D < 800 \mu\text{m}$ 时, 球腔 Q 值随直径 D 的增加而迅速增大, 这与文献[20]的报道相符合; $800 \mu\text{m} < D < 1000 \mu\text{m}$ 时, 球腔 Q 值达到最大(约 8×10^7); $D > 1000 \mu\text{m}$ 时, 球腔 Q 值随直径 D 的增加而减小; 相应的 DQ 乘积在 $1200 \mu\text{m} < D < 1400 \mu\text{m}$ 范围内最大(约 $8 \times 10^4 \text{ m}$).

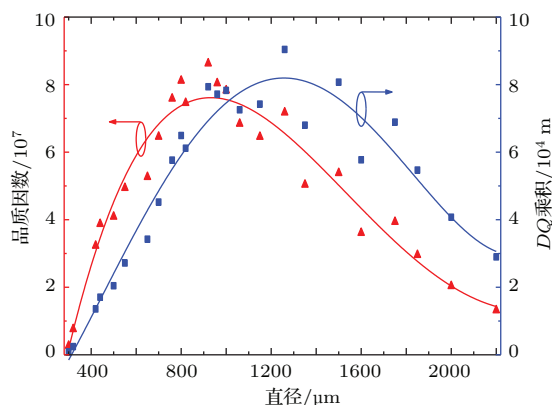


图 6 (网刊彩色) 球型腔品质因数与 DQ 乘积随直径的变化规律 (三角形为实验所测 Q 值, 正方形为 DQ 乘积, 实线为多项式拟合曲线)

Fig. 6.(color online) Q value and DQ production versus diameter D . Tested Q are marked by triangles; DQ productions are marked by squares; Line is polynomial fitting of Q and DQ .

实验所制备的球腔直径 D 在 1550 nm 波段满足 $D/\lambda > 15$ ($D > 20 \mu\text{m}$) 条件, 可忽略 $Q_{\text{辐射}}$ 对 Q 的影响. 通过不同直径球腔的高倍 CCD 显微照片(图 3)可以看出, 当球腔直径相对较小腔体纯净无杂质且表面光滑, 随 D 的增大腔体表面变得粗糙, $D > 1000 \mu\text{m}$ 时出现气泡与杂质, $D > 2000 \mu\text{m}$, 球腔内部缺陷十分严重. 由(9)式可知当腔体表面粗糙度 σ 等因素确定时, $Q_{\text{散射}}$ 与 $D^{10/3}$ 成正比关系, 如图 1(b). 而 $D < 800 \mu\text{m}$ 时, 腔体表面十分光滑且腔体纯净, 因此球腔 Q 值随直径 D 的增加而迅速增大. 同样由(9)式可得表面粗糙度 σ 增大使得 $Q_{\text{散射}}$ 下降, 见图 1(c), 所以 $D > 800 \mu\text{m}$ 后, 由于表面粗糙度 σ 的变化 Q 值随 D 增大趋势不再明显. $D > 1000 \mu\text{m}$ 时, 表面粗糙度 σ 继续随直径增大而变大且气泡与杂质的引入使得吸收系数 α 随着直径的增大而迅速增大. 从(8)式可知吸收系数 α 的增大使得 $Q_{\text{吸收}}$ 急剧下降, 图 1(a), 这时 Q 受到 $Q_{\text{吸收}}$ 与 $Q_{\text{散射}}$ 的共同影响, 因此 $D > 1000 \mu\text{m}$ 后 Q 值随 D 的增大而减小.

3.3 球腔陀螺灵敏度计算

将表一中微球腔的直径 D 与 Q 值参数代入(9)式可以得到不同直径微球腔的理论陀螺极限灵敏度. 图 2 中圆点显示了试验中所制备微球腔的陀螺极限灵敏度的分布情况, 随着腔体直径 D 的增大, 球腔的陀螺极限灵敏度先升高后降低. 当球形谐振腔直径 $600 \mu\text{m} < D < 2000 \mu\text{m}$ 时, 其陀螺灵敏度皆能满足 $\delta\Omega < 30^\circ/\text{h}$ 条件(图中虚线), 达到战术级水平. 在 $D = 1260 \mu\text{m}$ 时, 球腔品质因数 $Q = 7.18 \times 10^7$, 此时得到最优陀螺极限灵敏度约为 $11.54^\circ/\text{h}$, 满足商业级应用的需求.

4 结 论

对谐振式陀螺光学谐振腔的陀螺灵敏度进行研究分析, 通过优化 DQ 乘积的方式提升陀螺灵敏度. 采用熔融法制备了不同直径 ($300\text{--}2200 \mu\text{m}$) 的球形谐振腔, 分析球形谐振腔 Q 值、 DQ 乘积、极限灵敏度与谐振腔直径 D 的对应关系及其原因, 获得最优参数的面向谐振式光学陀螺的球形谐振腔敏感单元. 随着谐振腔直径 D 的增大谐振腔 Q 值、 DQ 乘积先升高后降低, 陀螺灵敏度先升高后下降. $D = 1260 \mu\text{m}$ 时, 球腔品质因数 $Q = 7.18 \times 10^7$, 得到最优陀螺极限灵敏度为 $11.54^\circ/\text{h}$, 充分满足商业级应用的需求, 为芯片级、高精度、低成本的新型谐振式微光学陀螺的研究奠定了实验基础.

参考文献

- [1] Kolkowitz S, Jayich A C B, Unterreithmeier Q P, Bennett S D, Rabl P, Harris J G E, Lukin M D 2012 *Science* **335** 1603
- [2] Deng S S, Xiao Z S, Yan L, Huang A P 2012 *Physics* **41** 0 (in Chinese) [邓思盛, 肖志松, 燕路, 黄安平 2012 物理 **41** 0]
- [3] Graydon O 2012 *Nat. Photonics* **6** 12
- [4] Hotate K, Harumoto M 1997 *J. Lightwave. Technol.* **15** 466
- [5] Ciminelli C, Dell'Olio F, Campanella C E, Armenise M N 2010 *Adv. Opt. Photonics* **2** 370
- [6] Dell'Olio F, Ciminelli C, Armenise M N, Soares F M, Rehbein W 2012 *Indium Phosphide and Related Materials (IPRM) 2012 International Conference on IEEE*, August 27–30, 2012 p124
- [7] YAN Y Z 2012 *Ph. D. Dissertation* (Taiyuan: North University of China) (in Chinese) [严英占 2012 博士学位论文 (太原: 中北大学)]

- [8] Zhang J H, Xu P F, Li X F, Xue C Y, Liu J, Yan S B 2013 *J. Appl. Opt.* **34** 1057 (in Chinese) [张建辉, 徐鹏飞, 李小枫, 薛晨阳, 刘俊, 闫树斌 2013 应用光学 **34** 1057]
- [9] Guo Z B, Tang J, Liu J, Wang M H, Shang C L, Lei L H, Xue C Y, Zhang W D, Yan S B 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 227802 (in Chinese) [郭泽彬, 唐军, 刘俊, 王明焕, 商成龙, 雷龙海, 薛晨阳, 张文栋, 闫树斌 2014 物理学报 **63** 227802]
- [10] Hong L F, Zhang C X, Feng L S, Lei M, Ma Y J 2011 *Chin. J. Laser* **38** 103 (in Chinese) [洪灵菲, 张春熹, 冯丽爽, 雷明, 马迎建 2011 中国激光 **38** 103]
- [11] Ma H L, Jin Z H, Ding C, Wang Y L 2004 *Chin. J. Laser* **31** 1001 (in Chinese) [马慧莲, 金仲和, 丁纯, 王跃林 2004 中国激光 **31** 1001]
- [12] Ezekiel S, Balsamo S R 1977 *Appl. Phys. Lett.* **30** 478
- [13] Ilchenko V S, Yao X S, Maleki L 1999 *Opt. Lett.* **24** 723
- [14] Grudinin I S, Matsko A B, Savchenkov A A, Strekalov D, Ilchenko V S, Maleki L 2006 *Opt. Commun.* **265** 33
- [15] Vernooy D W, Ilchenko V S, Mabuchi H, Streed E W, Kimble H J 1998 *Opt. Lett.* **23** 247
- [16] Yan Y Z, Ji Z, Wang B H, Yan S B, Xiong J J, Ma J 2010 *Chin. J. Laser* **7** 1789 (in Chinese) [严英占, 吉喆, 王宝花, 闫树斌, 熊继军, 马骏 2010 中国激光 **7** 1789]
- [17] Ward J M, O'Shea D G, Shortt B J, Morrissey M J, Deasy K, Chormaic S G N 2006 *Rev. Sci. Instrum.* **77** 083105
- [18] Knight J C, Cheung G, Jacques F, Birks T A 1997 *Opt. Lett.* **22** 1129
- [19] Cui J M, Dong C H, Zou C L, Sun F W, Xiao Y F, Han Z F, Guo G C 2013 *Appl. Optics* **52** 298
- [20] Yan Y Z, Zou C L, Yan S B, Sun F W, Ji Z, Liu J, Zhang Y G, Wang L, Xue C Y, Zhang W D, Han Z F, Xiong J J 2011 *Opt. Express* **19** 5753

Optimization of microsphere's DQ product based on resonant micro-optical gyro^{*}

Liu Jian-Hua Tang Jun Shang Cheng-Long Zhang Wei Bi Yu Zhai Chen-Ting
Guo Ze-Bin Wang Ming-Huan Guo Hao Qian Kun Liu Jun[†] Xue Chen-Yang

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

(Received 25 November 2014; revised manuscript received 16 February 2015)

Abstract

Based on the development of high sensitivity, low cost, high integration and miniaturization demand of the resonant micro-optical gyro(R-MOG), and in order to achieve a resonant micro-optical-mechano-electrical integrative gyro having high sensitivity, a microsphere optical resonator key sensitive element for producing a cavity with high quality value (Q value) and large diameter in the field of integrated optical micro resonator is proposed, for making a resonant micro optical gyro. Microsphere optical resonator is made by means of water-hydrogen flame melting, and the SiO_2 microspherical cavity is formed under the natural cooling and contraction surface tension. Microsphere optical resonator with its diameter D ranging from 300 μm to 2200 μm is fabricated by melting method with hydrogen flame as a heat source through controlling the hydrogen flame's area by regulating the flow of hydrogen gas. The resonator serves as the key unit of the resonant optical gyro sensitive parts, its Q value and diameter D have direct effect on the performance of the resonant angular velocity sensor. Affect parameters on the performance of the microsphere optical resonator with different diameters is tested and processed to obtain the result. The corresponding relationship among Q value, DQ product, resonant micro-optical gyro's sensitivity and microspherical cavity diameter D is analyzed, and the reason for them is given. With the increase of microspherical cavity diameter D , the Q value and DQ product reduce after rising first, while the gyro sensitivity goes to rise and fall. Based on the microsphere optical resonator DQ product optimization research, the resonant micro-optical gyro's key sensitive unit with best parameters is obtained. When the microspherical cavity diameter D varies from 600 to 200 μm , the gyro sensitivity can meet the condition that $\delta\Omega < 30^\circ/\text{h}$, which arrives at the tactical level. When the microsphere cavity diameter D is 1260 μm , the Q value of microsphere optical resonator is 7.18×10^7 and the corresponding optimal limited sensitivity of the resonant micro-optical gyro is almost $10^\circ/\text{h}$, and this result adequately meets the requirement of business level gyro applications. This work can serve as an experimental foundation in the research of new type resonant micro optical gyro at chip level, high accuracy and low cost, and will also provide a technical reference for further study of high integrated and high precision resonant micro optical gyro.

Keywords: microsphere cavity, DQ product, sensitivity, micro optical gyroscope

PACS: 42.60.Da, 42.81.Pa, 78.20.-e

DOI: 10.7498/aps.64.154206

* Project supported by the National Science Fund for Distinguished Young Scholars of China (Grant No. 51225504), the Key Program of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 91123036), and the Program for the Top Young Academic Leaders of Higher Learning Institutions of Shanxi.

† Corresponding author. E-mail: liuj@nuc.edu.cn