

锥形光纤微球腔谐振陀螺光学模式非互易性研究

王明焕 唐 军 郭泽彬 商成龙 张天恩 雷龙海 郭 浩 刘建华 薛晨阳 张文栋 刘 俊

中北大学电子测试技术国防科技重点实验室仪器科学与动态测试教育部重点实验室, 山西 太原 030051

摘要 通过 Rsoft 软件对锥形光纤倏逝场能量分布特性进行仿真,从理论上分析锥形光纤激发微谐振腔非互易性产生的原因。实验中,光纤熔融二氧化硅微球腔通过高精度三维调节架沿光纤方向移动,每次移动相同距离选取测试点,记录光源正反传输情况下微球腔谐振谱线,得到谐振谱线特征参量随倏逝场变化的非互易性变化规律。通过计算微球腔理论鉴频曲线获得非互易性对陀螺动态范围与灵敏度的影响,并提出抑制方法。

关键词 激光光学; 光学微球腔; 锥形光纤; 倏逝场; 非互易性; 谐振式光学陀螺

中图分类号 TN815 文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0305007

Optical Model Non-Reciprocity of Microsphere Resonator Excited by Tapered Fiber for Resonator Optic Gyroscope

Wang Minghuan Tang Jun Guo Zebin Shang Chenglong Zhang Tian'en

Lei Longhai Guo Hao Liu Jianhua Xue Chenyang Zhang Wendong Liu Jun

Key Laboratory of Instrumentation Science and Dynamic Measurement of the Ministry of Education, National Defense Science and Technology Key Laboratory of Electronic Test and Measurement, North University of China, Taiyuan, Shanxi 030051, China

Abstract Based on Rsoft software, the tapered fiber evanescent field distribution is simulated, and the reason for the nonreciprocity of micro-resonator excited by tapered fiber is analyzed in theory. Optical fiber fused silica microsphere cavity is used in the experiment. Through high precision three dimensional adjustment along the fiber direction, test points are selected after moving the same distance and microsphere cavity resonance spectra are recorded under the case of forward and converse transmission of light, getting the regular pattern of non-reciprocity of the resonance spectral parameters with the variation of evanescent field. By calculating the frequency discrimination curve of microsphere cavity, the influence of non-reciprocity on the dynamic range and sensitivity of gyroscope is got, and suppression methods are proposed.

Key words laser optics; microsphere resonator; tapered fiber; evanescent field; non-reciprocity; resonator optic gyroscope

OCIS codes 140.4780; 190.4370; 190.4390

1 引 言

光学微球腔^[1]作为谐振式光学陀螺的核心谐振单元,其角速度传感特性已经被证实^[2]。凭借极小的模式体积^[3],可以达到约 10^9 的超高 Q 值^[4-5],直径小于1 mm,抗 8.2×10^4 g以上冲击^[6]。在保证高灵敏特性的同时,极

收稿日期: 2014-09-30; 收到修改稿日期: 2014-10-29

基金项目: 国家自然科学基金(91123036,91123016)、国家杰出青年科学基金(51225504)、国家973计划(2012CB723404)、山西省高等学校优秀青年学术带头人支持计划

作者简介: 王明焕(1989—),男,硕士研究生,主要从事微纳光学方面的研究。E-mail: wangminghuan2013@126.com

导师简介: 刘俊(1968—),男,博士,教授,主要从事微米纳米技术、惯性测试技术、仿生导航等方面的研究。

E-mail: liuj@nuc.edu.cn(通信联系人)

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

大程度地减小了陀螺的体积,并提高了稳定性,在小型化、集成化、抗高过载上具有独特的优势,是惯性导航技术微型化、集成化的关键器件^[7-9]。

光学微球腔高 Q 模式倏逝场激发主要采用棱镜、锥形光纤等方式耦合激发^[10-13],其中锥形光纤近场耦合,耦合效率可以高达 95% 以上,并且能在输入与输出端有效地滤去多余的光学模式,保存本征模式^[14],为光学谐振腔高 Q 模式激发中最常用的耦合方法。但是,由于较长的锥区长度,倏逝场沿锥形区域从光纤的输入端到输出端单调递减,使得沿锥区变化方向不同耦合位置输出透射峰的特征参量存在差异,产生非互易性效应^[15]。

本文采用 Rsoft 软件对锥形光纤倏逝场仿真,得出其分布情况,从而了解锥形光纤与微球腔耦合系统的非互易特性产生原因。实验中,微球腔通过高精度三维调节架沿光纤方向移动,相同距离选取测试点,记录光源正反传输情况下,微球腔谐振谱线,得到谐振谱线特征参量随倏逝场变化的非互易性变化规律,并分析其对陀螺输出信号的影响。

2 锥形光纤倏逝场仿真

为了解锥形光纤倏逝场传输特性,利用 Rsoft 软件对锥形光纤锥区能量分布进行仿真,观察倏逝场的分布形式。对于普通的阶跃型光纤,基模场满足贝塞尔函数分布,其电场振幅 E 可近似表示为

$$E = \exp\left(-\frac{r^2}{\omega_0}\right)\exp(i\beta z), \quad (1)$$

式中 r 为径向坐标, ω_0 为基模场的模半径, β 为传输常数, z 为轴向坐标, i 为虚数单位。 ω_0 由马休斯判据,表示为

$$\frac{\omega_0}{d} = 0.65 + 1.069V^{-3/2} + 2.879V^{-6}, \quad (2)$$

为了分析方便,定义归一化工作频率 V 为

$$V = \frac{2\pi d}{\lambda} \sqrt{n_1^2 - n_2^2}, \quad (3)$$

式中 d 为纤芯直径, λ 为光在真空中波长, n_1 为光纤芯层折射率, n_2 为光纤包层的折射率。当光纤进入锥形渐变区后,随着芯径减小, V 值减小,纤芯中的基模随之向外扩散,以倏逝场的形式向锥区周围传输,从而激发微球腔的高 Q 谐振模式。

设置光纤输入端直径为 $9 \mu\text{m}$, 长度为 $500 \mu\text{m}$, 渐变区长度为 $100 \mu\text{m}$, 锥区直径为 $2.5 \mu\text{m}$, 长度为 $100 \mu\text{m}$ 。输出端与入射端对称,整个结构成中心对称图形。

通过图 1 所示锥形光纤光能量传输与激发倏逝场能量分布可以看出,在入射端 $z=0$ 到 $z=450 \mu\text{m}$ 的位置,光能量完全被束缚在光纤内部,从 $z=450 \mu\text{m}$ 位置进入光纤锥区,直径开始逐渐变小,当减小到 $d \approx 4 \mu\text{m}$ 时,光能量开始以倏逝场的形式向空间扩散,在入射端的锥区达到最强,并逐渐扩散衰减,到达输出端完全

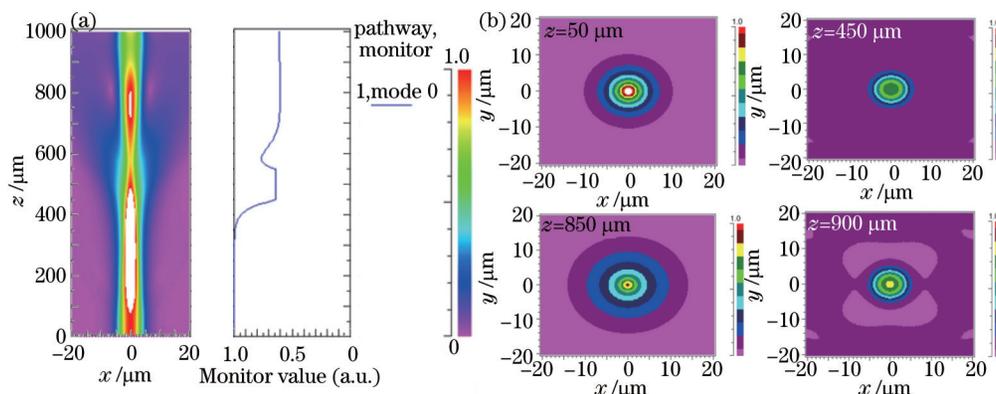


图 1 (a) 光沿 z 轴正方向传输的模场分布图; (b) 光在 z 轴不同位置横截面的模场分布图

Fig.1 (a) Mode field distribution of transmission of light along the positive z -axis direction; (b) mode field distribution of light cross sections at different locations in the z -axis

以光能量的形式在光纤内部传输,可以从不同光纤横截面的能量分布直观地看出光能的分布形式。

由此可见,以锥形光纤倏逝场激发的光学谐振腔耦合模式,在除锥区中心点外的位置发生耦合谐振时,当输入输出端调换后,由于产生的倏逝场能量密度的改变,必然引入非互易性偏差。

3 实验与结果分析

实验中使用的微球腔采用SMF-28单模光纤氢火焰熔融法制备,首先去除光纤表层的涂覆层,在氢火焰的高温下融化,熔融后的光纤在自身材料表面张力的作用下形成了球体^[6];锥形光纤的制备采用拉锥机,通过控制氢火焰的温度与步进电机转速,控制拉锥速度和锥区长度,实现锥形光纤的超低损耗(0.29 dB)。拉锥长度为26 mm,纤锥直径约为2.5 μm,此参数的锥形光纤可以有效地激发微球谐振腔的高Q模式。

测试系统如图2所示,使用波长可调节范围为1520~1570 nm的Velocity6328半导体可调谐激光器作为光源,实验中使用中心波长为1550 nm的信号发生器对激光器进行外部调制,调制电压为1 V,调制频率为50 Hz。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^[7]。

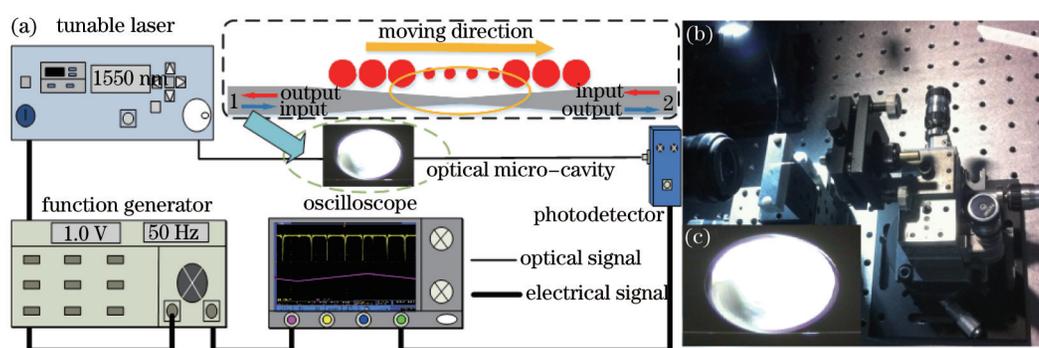


图2 耦合测试系统。(a) 系统框图; (b) 装置整体图; (c) 耦合点位置

Fig.2 Coupling testing system. (a) Block diagram of the system; (b) device entirety figure; (c) coupling point location

实验中通过保偏跳线连接双锥光纤输入端,锥形光纤锥腰直径约为2.5 μm时,损耗较低仅为0.5 dB~0.7 dB,入射光在经过光纤锥区部分时会产生倏逝场,从而激发微球腔高Q模式,光纤输出端通过保偏跳线连接到光电探测器转换为电信号,通过示波器实时跟踪读取。

激光器输出端连接1端口,作为光源的输入,2端口输出,与光电探测器相连。通过高精度三维调节架,调节微球腔与锥形光纤的耦合位置,从靠近1端口的锥区开始处,沿着渐变区向锥区中心位置水平移动,保持微球腔垂直赤道面低端与锥形光纤相切,如图2(c)所示,水平位移每次调节相同距离取测试点,记录输出透射谱数据,保持耦合位置不变,将输入输出端对调,即将激光器光源接2端口作为输入端、光电探测器接1端口作为输出端,记录输出透射谱,直到微球腔移动接近光纤锥区的中心点位置。实验中将锥形光纤接头固定在光学平台上,正反传输端对换过程中,只调整激光器与光电探测器连接的保偏跳线,减少单模锥形光纤尾纤的扭曲产生的偏振噪声对测试结果造成影响。

在沿光纤方向记录耦合位置水平移动过程中,光从锥形光纤通过正反传输,从透射峰的耦合效率差值、谐振中心频率偏差Q值偏差拟合后,可以看出整体的变化趋势,其谐振中心频率偏差Q值偏差随着耦合位置接近锥形光纤中心点逐渐减小,最终接近零,如图3所示,这说明在锥区中心位置,锥形光纤与微球腔耦合系统具有较良好的互易性。

锥形光纤倏逝场激发微球腔谐振式陀螺系统中非互易特性对陀螺系统影响较大,谐振式光学陀螺的基础理论是Sagnac效应,在谐振腔旋转的过程中,通过检测正向传输(CW)与反向传输(CCW)两路输出透射谱的频差,根据锥形光纤激发微球腔非互易性引入的谐振峰值偏差,直接影响陀螺的动态范围与角速度敏感状态。对锥形光纤倏逝场激发微球腔透射谱进行高斯拟合,使用Matlab进行微分运算,得出鉴频曲线。

鉴频曲线如图4所示,理论线性区频差 $\Delta F = \pm 0.38$ MHz,根据谐振式光学陀螺的Sagnac效应,频差 ΔF 与转速 Ω 的对应关系为

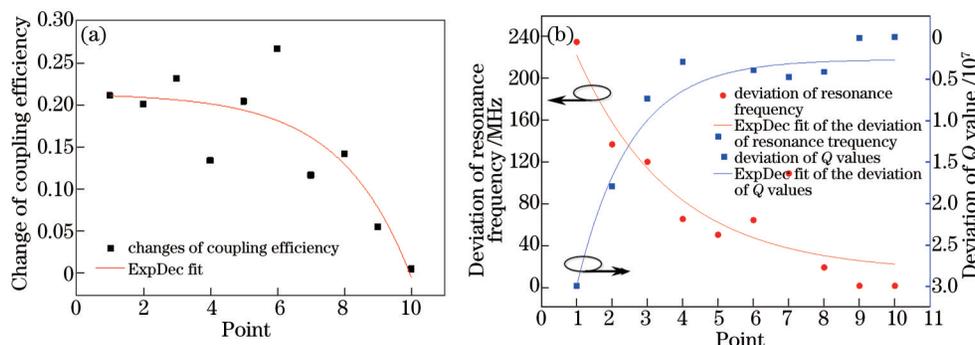


图3 (a) 输入输出正/反对调耦合效率偏差随耦合位置的变化; (b) 谐振频率、 Q 值随耦合位置的变化偏差

Fig.3 (a) Changes of input-output deviation to the increase in coupling efficiency coupled with its position; (b) variation of resonance frequency and Q value with coupling position deviation

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

式中 D 为谐振腔直径, $D=1 \text{ mm}$, λ 为中心波长, $\lambda = 1550 \text{ nm}$, n 为材料折射率, $n = 1.45$, A 为谐振腔的面积, L 为谐振腔的周长, 得出陀螺理论动态范围为 $\pm 48954^\circ/\text{s}$ 。实际动态范围为正反两路鉴频曲线线性区频差的正交部分, 由于锥形光纤互易性引起的谐振谱线谐振点存在偏差, 使得实际正反两路鉴频曲线线性区的相交部分为 $\pm 0.35 \text{ MHz}$, 对应陀螺动态范围为 $\pm 45089^\circ/\text{s}$ 。随着耦合位置远离锥形光纤中心位置, 正反两路鉴频曲线线性区相交部分单调减少, 实际动态范围随之减小; 当鉴频曲线线性区相交部分消失后, 动态范围减为 0, 陀螺仪失效。

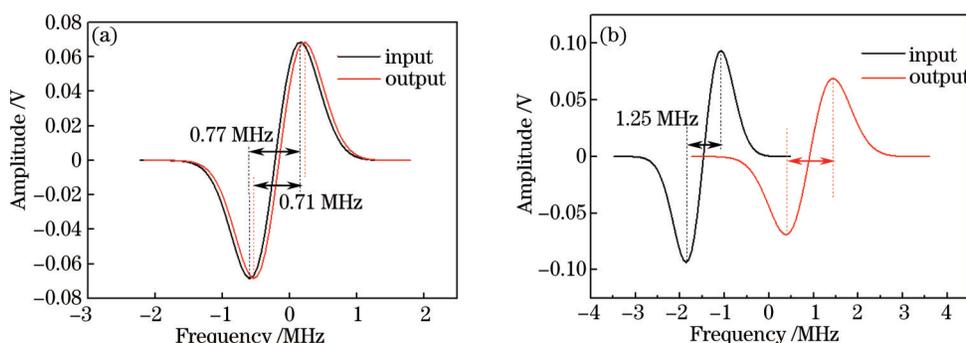


图4 鉴频曲线。(a) 线性区相交; (b) 线性区不相交

Fig.4 Frequency curve. (a) Overlapping between the linear regions; (b) without overlapping between the linear regions
陀螺系统的标度因数为 K , 陀螺仪旋转角速度范围内, 陀螺仪的标度因数不对称性 K_a 增加

$$K_a = \frac{|K_{(+)} - K_{(-)}|}{\bar{K}}, \quad (5)$$

式中 $\bar{K} = \frac{K_{(+)} + K_{(-)}}{2}$ 为标度因数平均值, $K_{(+)}$ 为正转输入角速度范围内陀螺仪标度因数, $K_{(-)}$ 为反转输入角速度范围内陀螺仪标度因数, 大幅度降低了系统灵敏度。若想将此种非互易性降到最低, 则要使耦合位置尽量靠近锥区的中心点。

4 结 论

锥形光纤倏逝场激发微球腔高 Q 谐振模式, 由于倏逝场能量分布呈非对称性, 使得锥形光纤微球腔耦合体系存在非互易性噪声, 在谐振式光学陀螺的应用中, 对检测信号引入较大的偏差。采用锥形光纤锥区中心耦合的方式, 可有效抑制锥形光纤微球腔谐振式光学陀螺应用中由锥形光纤与谐振腔组成的耦合系统产生的非互易性噪声, 降低对灵敏度的影响。

参 考 文 献

1 Lü Sheqin, Li Chaoran, Wu Yuehao, *et al.*. Research progress of micro/nano-optical device based on chalcogenide glass[J]. Laser &

- Optoelectronics Progress, 2014, 51(5): 050001.
吕社钦, 李超然, 吴越豪, 等. 硫系玻璃微纳光器件研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(5): 050001.
- 2 Zhang Jianhui, Xu Pengfei, Li Xiaofeng, *et al.*. Validation of high- Q optical microsphere resonator angular velocity sensor[J]. Journal of Applied Optics, 2013, 34(6): 1057-1061.
张建辉, 徐鹏飞, 李小枫, 等. 高 Q 光学微球腔角速度传感效应验证[J]. 应用光学, 2013, 34(6): 1057-1061.
- 3 Dai Shixun, Lu Laiwei, Tao Guangming, *et al.*. Research progress of glass microspheres for optical microcavity[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2012, 49(8): 080001.
戴世勋, 路来伟, 陶光明, 等. 用于光学微腔的玻璃微球研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2012, 49(8): 080001.
- 4 Sun Xianming, Liu Wanqiang, Wang Haihua, *et al.*. Study on resonant models in two-layers micro-sphere cavity[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(5): 0529001.
孙贤明, 刘万强, 王海华, 等. 双层微球腔谐振模式研究[J]. 光学学报, 2013, 33(5): 0529001.
- 5 Takiguchi K, Hotate K. Evaluation of the output error in an optical passive ring-resonator gyro with a 90° polarization-axis rotation in the polarization-maintaining fiber resonator[J]. IEEE Photonic Tech L, 1991, 3(1): 88-90.
- 6 Y Z Yan, C L Zou, S B Yan, *et al.*. Robust spot-packaged microsphere-taper coupling structure for in-line optical sensors[J]. IEEE Photonic Tech L, 2011, 23(22): 1736-1738.
- 7 Vawter G A, Zubrzycki W J, Hudgens J J, *et al.*. Developments in Pursuit of a Micro-Optic Gyroscope[R]. Springfield: US Department of Commerce National Information Service, 2003.
- 8 Suzuki K, Takiguchi K, Hotate K. Monolithically integrated resonator microoptic gyro on silica planar lightwave circuit[J]. J Lightwave Technol, 2000, 18(1): 66-72.
- 9 Wang K, Feng L, Wang J, *et al.*. Alternative method for design and optimization of the ring resonator used in micro-optic gyro[J]. Appl Opt, 2013, 52(7): 1481-1486.
- 10 Del'Haye P, Herr T, Gavartin E, *et al.*. Octave spanning tunable frequency comb from a microresonator[J]. Phys Rev Lett, 2011, 107(6): 063901.
- 11 Lee H, Chen T, Li J, *et al.*. Chemically etched ultrahigh- Q wedge-resonator on a silicon chip[J]. Nature Photonics, 2012, 6(6): 369-373.
- 12 Schell A W, Kaschke J, Fischer J, *et al.*. Three-dimensional quantum photonic elements based on single nitrogen vacancy-centres in laser-written microstructures[J]. Sci Rep, 2013, 3: 1577.
- 13 Yan Yingzhan, Ji Zhe, Wang Baohua, *et al.*. Evanescent wave excitation of microsphere high- Q model using tapered fiber[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(7): 1789-1793.
严英占, 吉喆, 王宝花, 等. 锥形光纤倏逝场激发微球腔高 Q 模式[J]. 中国激光, 2010, 37(7): 1789-1793.
- 14 Monifi F, Odemir S K, Friedlein J, *et al.*. Encapsulation of a fiber taper coupled microtoroid resonator in a polymer matrix[J]. IEEE Photonic Tech L, 2013, 25(15): 1458-1461.
- 15 Niehusmann J, Vörckel A, Bolivar P H, *et al.*. Ultrahigh-quality-factor silicon-on-insulator microring resonator[J]. Opt Lett, 2004, 29(24): 2861-2863.
- 16 Zhang Yuguang, Li Peng, Wang Li, *et al.*. Effect of the environment on microsphere Q factor[J]. Acta Photonica Sinica, 2011, 40(5): 803-806.
张宇光, 李鹏, 王丽, 等. 外界环境对微球腔品质因数的影响[J]. 光子学报, 2011, 40(5): 803-806.
- 17 Wang Li, Yan Yingzhan, Zhang Yuguang, *et al.*. Effect of vibration noise on the high- Q optical microcavity coupling system and its suppression methods[J]. Chinese Journal of Luminescence, 2011, 32(9): 950-955.
王丽, 严英占, 张宇光, 等. 振动噪声对高 Q 光学微腔耦合系统的影响及抑制方法[J]. 发光学报, 2011, 32(9): 950-955.

栏目编辑: 史敏