

光纤环形谐振腔 Q 值与谐振深度优化研究

湛浩然¹, 张瑶², 薛晨阳¹, 张成飞¹, 王颖¹, 郑永秋¹

(1. 中北大学 仪器科学与动态测试教育部重点实验室, 太原 030051;

2. 中北大学 信息与通信工程学院, 太原 030051)

摘要: 高 Q 值、高谐振深度的光纤环形谐振腔影响着以其为核心敏感元件的光学检测系统精度。为了提升谐振腔 Q 值和谐振深度, 理论分析了腔长、分光比和腔内损耗对两者的影响。分别使用 5 种分光比的耦合器搭配 5 种长度的光纤制作了谐振腔并进行测试。结果表明: Q 值与腔长呈正相关, 与分光比呈负相关; 谐振深度和分光比与腔内损耗之间的匹配程度呈正相关。实验中得到了 Q 值超过 1×10^8 、谐振深度超过 85% 的谐振腔。

关键词: 光纤环形谐振腔; Q 值; 谐振深度; 临界耦合

中图分类号: TN253 文献标识码: A 文章编号: 1002-5561(2018)01-0056-04

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2018.01.016

Research on optical fiber ring resonator Q value and resonant depth optimization

CHEN Haoran¹, ZHANG Yao², XUE Chenyang¹,
ZHANG Chengfei¹, WANG Ying¹, ZHENG Yongqiu¹

(1. Key Laboratory of Instrumentation Science and Dynamic Measurement, Ministry of Education, North University of China, Taiyuan 030051, China; 2. School of Information and Communication Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: The optical fiber ring resonator with high Q value and high resonant depth affect the detection precision of the optical detection system with the resonator as core of sensitive component. In order to improve Q value and resonant depth, this paper analyzes the effect of length, coupling ratio and loss of the fiber resonator theoretically. It fabricates the resonators fabricated with five coupling ratios of the couplers and five lengths fiber respectively and carries out the test. The result shows that the Q value is positively related with the length and negatively related with the coupling ratio respectively; the resonant depth is positively related with matching degree between coupling ratio and loss of the fiber ring resonator. The experiment obtains the resonator with Q value over 1×10^8 and the resonant depth over 85% in the experiment.

Key words: optical fiber ring resonator; Q value; resonant depth; critical coupling

0 引言

光学谐振腔是利用光纤制作而成的^[1], 凭借其简单的结构和良好的光学特性, 被广泛应用于光学陀螺^[2]、光纤滤波器、光纤激光器、光电振荡

收稿日期: 2017-09-07。

基金项目: 国家自然科学基金杰出青年基金(51225504)资助; 国家自然科学基金(61640601)资助; 中北大学 2016 年校科研基金(XJJ2016030)资助; 重点实验室基金(1420010414162001002)资助; 中北大学校级科技立项(20161345)资助。

作者简介: 湛浩然(1992-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为微纳光纤传感。

器和高分辨率光谱分析仪等多种领域, 在光学延迟线、生物传感检测等方面也有潜在的应用前景。目前, 光学谐振腔主要有光波导谐振腔(Optical Waveguide Resonator, OWR)、微球腔(Microsphere Resonator, MR)和光纤环形谐振腔(Fiber Ring Resonator, FRR)3 类。OWR 在谐振式光学陀螺上的应用已取得了很大进步^[3-8], 其 Q 值达到了 $4.7 \times 10^{79-111}$, 但由于制作工艺水平限制, OWR 的传输损耗还有待进一步降低。MR 在批量制作和封装工艺方面并不成熟且传播模式复杂多样, 投入

实际应用较为困难^[12]。FRR 可将光能集中于光纤纤芯中进行有效存储,具有连接简单方便、插入损耗低和制作工艺成熟的优点,已取得广泛应用,其 Q 值可达 $10^7 \sim 10^9$ 。

Q 值和谐振深度是光纤环形谐振腔的主要参数,影响着以谐振式光学陀螺和光电振荡器为代表的光学检测系统的检测精度^[13]。因此,本文对 Q 值和谐振深度进行深入研究,采取相应措施提高 Q 值和谐振深度,为开展基于光纤环形谐振腔的各种应用研究奠定基础。

1 仿真分析

1.1 Q 值仿真

Q 值是表征 FRR 对传播光场约束能力的参量,其定义为:FRR 内储存的光能量与光在谐振腔内循环一周能量损耗的比值。本文采用半高全宽法对 FRR 的 Q 值进行计算,该方法通过连续扫描谐振腔泵浦激发光测得谐振谱线的半高全宽,即可得到 Q 值^[13,14]:

$$Q = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} = \frac{\lambda}{\frac{c}{n\pi L} \arccos \frac{2\gamma\tau}{1+\tau^2\gamma^2}} \quad (1)$$

其中, λ 为激光器输出中心频率, $\Delta\lambda$ 为 FRR 的半高全宽, c 是光在真空中的速度, n 是谐振腔折射率, L 为腔长, τ 为环路光强度传输因子, γ 为耦合器的分光比。由式(1)可知,提高腔长 L 或降低分光比 γ 和环路强度传输因子 τ 均可提高 FRR 的 Q 值,但 τ 在 FRR 中变化不大,可忽略不计,故 L 和 γ 为影响 Q 值的主要因素。本文根据式(1)建立 L 、 γ 对谐振腔 Q 值的影响曲线,如图 1 所示。

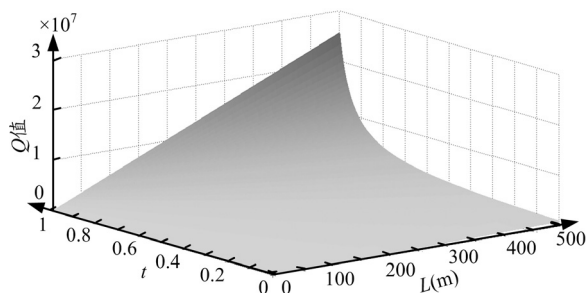


图 1 腔长 L 与分光比 γ 对谐振腔 Q 值的影响曲线

图 1 中, t 表示耦合器直通端透射率, $t = \sqrt{1-\gamma^2}$ 。可以看出, Q 值与腔长成正相关,与分光比成负相关;当 $t > 0.9$ 时, Q 值增长较快。因此,提高腔长和降低分光比均可提高谐振腔的 Q 值。但是,在实际应用中,若腔长过长,温度的不均匀分布会导致谐振谱漂移,这会增加腔内的传输损耗^[11,13]。另外,由于工艺水平的限

制,耦合器的分光比无法做到太低(低于 0.1:99.9),这两点是限制谐振腔 Q 值进一步提升的主要原因。

1.2 谐振深度(ρ)仿真

光纤耦合器利用光波的倏逝场耦合现象实现相邻光纤之间的分光与合光,是 FRR 的核心组成部件。FRR 谐振深度 ρ 用来表征谐振腔的耦合效率, ρ 越高表示耦合效率越高,其定义表达式为:

$$\rho = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max}} \quad (2)$$

其中, $I_{\max}$ 是谐振谱线最大值, $I_{\min}$ 是谐振谱线最小值, $I_{\max} - I_{\min}$ 为谐振谱的振幅范围。谐振深度 ρ 与腔内光能量的损耗与补充相关,当腔内光能量损耗与补充达到动态平衡时,腔输出光强为 0,谐振深度达到最高, $\rho=1$ 。

由耦合器熔接而成的 FRR 如图 2 所示,设端口 1、2、3、4 中传播的光场强度分别为 E_1 、 E_2 、 E_3 、 E_4 。光由端口 1 进入耦合器,一部分直接从直通端口 2 输出;另一部分光进入耦合器的耦合区,通过端口 4 进入腔内,在腔内传播一周后通过端口 3 再次进入耦合器,其中一部分通过直通端口 4 继续在腔内传播,另一部分进入耦合区后经端口 2 出腔。 E_1 、 E_2 、 E_3 、 E_4 之间满足关系^[15]:

$$\begin{Bmatrix} E_2 \\ E_4 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \gamma & jt \\ jt & \gamma \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} E_1 \\ E_3 \end{Bmatrix} \quad (3)$$

$$\gamma^2 + t^2 = 1 \quad (4)$$

其中, γ 和 t 均为实数, j 为虚数单位,谐振深度 ρ 为^[15]:

$$\rho = 1 - \left\{ \frac{\gamma - \tau}{1 - \gamma\tau} \right\}^2 \quad (5)$$

由式(5)可以得到 γ 和 τ 对 ρ 的影响规律,绘制成曲线,如图 3 所示。当 $\gamma > \tau$ 时,FRR 为过耦合状态, $\rho < 1$ 。当 $\gamma < \tau$ 时,FRR 为欠耦合状态,光通过耦合区未能完全耦合进谐振腔内^[15],则 $\rho < 1$ 。当 $\gamma = \tau$ 时,表明 E_2

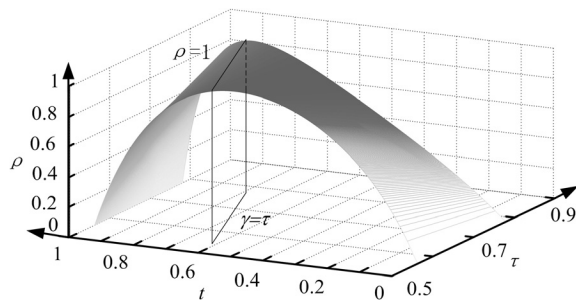


图 3 分光比 γ 与损耗对谐振深度影响曲线

输出光强为零,由 E_1 耦合进 FRR 的光能量等于光在腔内的损耗,使得腔内光能量的损耗与补充达到动态平衡,保证腔内能量恒定不变,此时 FRR 处于临界耦合状态,谐振深度最高, $\rho=1$ 。

FRR 内部的总损耗包括耦合器插入损耗、光纤传输损耗和熔接点损耗。FRR 内部插入损耗和光纤传输损耗(约 0.15dB/km)相对于熔接点损耗可忽略不计。因此,熔接点损耗是导致 FRR 内部损耗与分光比不匹配而无法达到理想临界耦合状态的主要原因。

综合图 1 和图 3 可知,在腔内损耗确定的情况下,选择合适的分光比与之匹配得到较高的谐振深度。由于光纤环长度在几十米量级内变化时,其传输损耗的变化可忽略不计。因此通过适当提高腔长可以得到较高的 Q 值。

2 实验测试

2.1 熔接点损耗实验

在检测光路中,因为条件的限制不能将所有光学器件都直接耦合在同一根光纤上,所以各光学器件必须通过熔接才能构成一个完整的光路,但熔接点增加了光强损耗。熔接点损耗与光纤切割面角度、端面平滑度、熔接机电极清洁程度和放电时间等诸多因素相关。

为了得到熔接点损耗,本文进行了多次测试实验,在相同的熔接环境和熔接参数下,将单模光纤剪断后进行熔接:光纤一端接激光器,另一端接光功率计。测试熔接前后读取光功率,得到的熔接点损耗如图 4 所示。每个熔接点引入损耗平均值为 0.07dB,图 2 中的 FRR 结构包括两个熔接点,引入的熔接损耗约为 0.14dB。

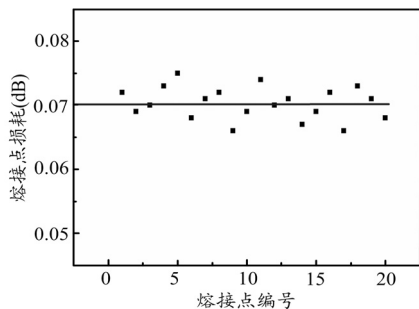


图4 熔接点损耗

2.2 谐振腔测试实验

我们根据前文仿真得出的结论,分别对5种分光比(1:9、5:95、2:98、1:99、0.1:99.9)和5种腔长(3m、5m、10m、21m、50m)的光纤环形谐振腔进行 Q 值和谐振深度测试,实验方案如图 5 所示。信号发生器将扫描信号加在激光器上对其进行扫描,同时显示在示波器上,激光器发出的激光进入环形谐振腔后经光电转

化,将谐振谱线显示在示波器上。实验中采用 NKT 激光器作为光源,耦合器采用深圳飞宇光纤公司生产的保偏光纤耦合器,通过光纤熔接技术得到相应 5 种腔长的光纤环形谐振腔。

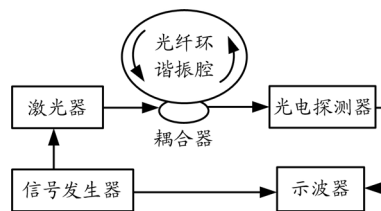
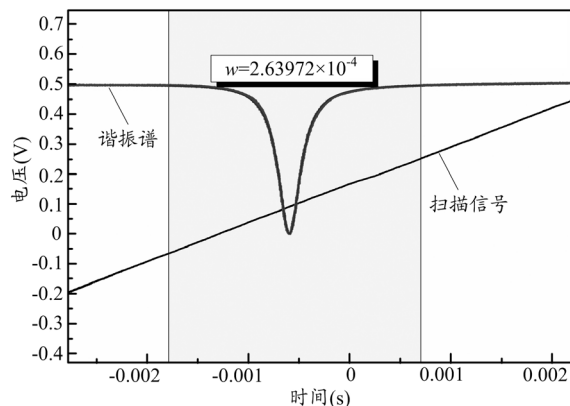
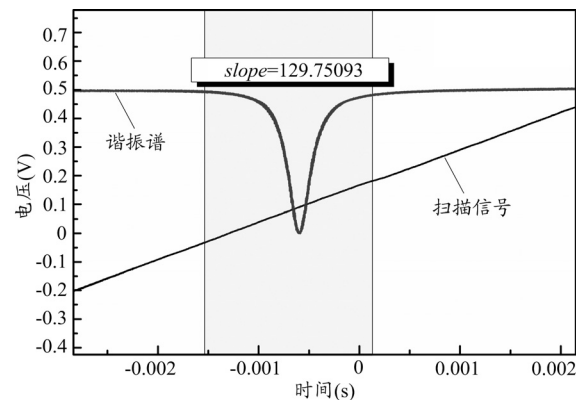


图5 实验方案

我们采用半高全宽法对 Q 值进行计算,NKT 激光器的中心频率为 λ , 其频率扫描系数 $K=69\text{MHz/V}$,得到的 Q 值如图 6 所示。



(a) 谐振谱半高全宽拟合

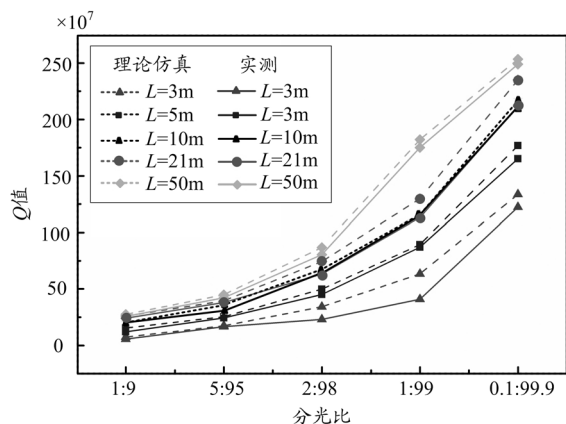
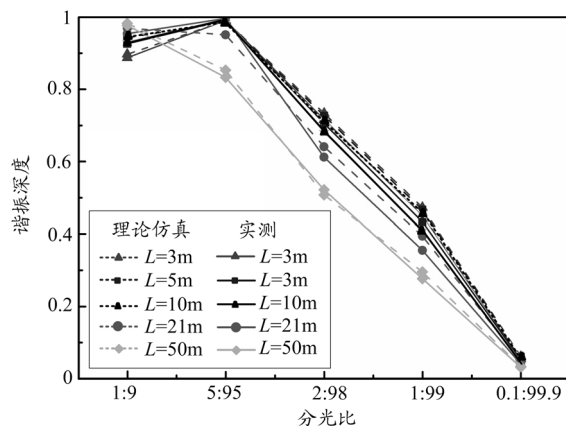


(b) 扫描电压斜率拟合

图6 半高全宽法计算 Q 值

通过对谐振谱线进行洛伦兹拟合得到半高全宽处的时间间隔 w , 通过对扫描信号进行线性拟合得到斜率($slope$),由此得到谐振谱线半高全宽对应的扫描电压 $\Delta v=w \times slope$, 则谐振谱线的半高全宽 $\Delta \lambda=\Delta v \times K$,根据式(2)即可得到谐振腔 Q 值,根据式(4)即可得到谐振深度。

我们将测试结果与相同参数条件下的理论计算数据进行对比,结果如图 7 所示。根据图 7 可以得出两个结论:①相同参数条件下,实验测试结果与理论

(a) 谐振腔 Q 值的理论仿真与实验测试结果对比

(b) 谐振深度的理论仿真与实验测试结果对比

图7 理论计算与实验结果对比

计算结果基本相符,变化趋势相差不大,说明理论模型较为准确。若在理想条件下,实验测试用光纤腔腔长和耦合器分光比与理论计算所用参数严格一致,测试数据与理论计算值将更为接近。②腔长为 50m 时,4 种分光比的谐振腔 Q 值均超过 1×10^8 ;分光比为 1:9 和 5:95 时的谐振腔谐振深度最高达到 98.22% 和 85.27%,具有较好的实用价值;分光比为 1:99 和 0.1:99.9 的谐振腔谐振深度仅为 29.52% 和 3.15%,不具备实用性。

3 结束语

本文详细介绍了光纤环形谐振腔腔长、分光比对 Q 值的影响,分析了腔内损耗与耦合器分光比的匹配程度和谐振深度的关系,并建模仿真完成了实验测试。测试结果表明:谐振腔 Q 值与腔长成正相关,与耦合器分光比成负相关,适当提高腔长、降低分光比均可提高 Q 值;谐振深度和分光比与腔内损耗的匹配程度成正相关,匹配程度越高,谐振深度越高,当腔内光

能量的损耗与补充处于动态平衡时,FRR 达到临界耦合状态,谐振深度最高。实验结果与理论仿真结果基本相符。另外,我们还得到了 Q 值超过 1×10^8 、谐振深度超过 85.27% 的光纤环形谐振腔。本文实现了高 Q 值、高谐振深度的 FRR,这为提高以 FRR 为核心敏感单元的光学检测系统精度提供了理论参考和实验基础。

参考文献:

- [1] 徐鹏飞,张建辉,孟祥然,等. 光纤腔动态谐振响应特性[J]. 红外与激光工程,2013,42(3):599-604.
- [2] NING Liang, GUO Lijun, KONG Mei, et al. Waveguide-type optical passive ring resonator gyro using frequency modulation spectroscopy technique[J]. Journal of Semiconductors, 2014, 35(12): 53-56.
- [3] DELL'OLIO F, CIMINELLI C, ARMENISE M N. System test of an optoelectronic gyroscope based on a high Q-factor InP ring resonator[J]. Optical Engineering, 2014, 53(12): 127104-1-127104-9.
- [4] AN P, ZHENG Y, YAN S, et al. High-Q microsphere resonators for angular velocity sensing in gyroscopes [J]. Applied Physics Letters, 2015, 106(6): 063504-1-063504-5.
- [5] WANG J, FENG L, WANG Q. Reduction of angle random walk by in-phase triangular phase modulation technique for resonator integrated optic gyro[J]. Opt. Express, 2016, 24(5): 5463-5468.
- [6] FENG L, WANG J, ZHI Y, et al. Transmissive resonator optic gyro based on silica waveguide ring resonator [J]. Opt. Express, 2014, 22(22): 27565-27575.
- [7] JIN Z, ZHANG G, MAO H, et al. Resonator micro optic gyro with double phase modulation technique using an FPGA-based digital processor[J]. Opt. Commun., 2012, 285(5): 645-649.
- [8] DELL'OLIO F, CONTEDECA D, CIMINELLI C, et al. New ultrasensitive resonant photonic platform for label-free biosensing [J]. Opt. Express, 2015, 23(22): 28593-28604.
- [9] MA H, ZHANG J, WANG L, et al. Resonant micro-optic gyro using a short and high-finesse fiber ring resonator [J]. Opt. Lett., 2015 (40): 5862-5865.
- [10] ADAR R, SERBIN M R, MIZRAHI V. Less than 1dB per meter propagation loss of silica waveguides measured using a ring resonator[J]. Journal of Lightwave Technology, 1994, 12(8):1369-1372.
- [11] SPENCER D T, BAUTERS J F, HECK M J R, et al. Integrated waveguide coupled Si_3N_4 resonators in the ultrahigh-Q regime [J]. Optica, 2014, 1(3): 153-157.
- [12] 金乐天,王克逸,周绍祥. 光学微球腔及其应用[J].物理,2002,31(10): 642-646.
- [13] 刘耀英,薛晨阳,郑华,等. 高精度环形谐振腔的结构设计及优化[J]. 红外与激光工程,2014,43(11):3689-3690.
- [14] 王莹. 光纤耦合谐振腔 Q 值增强的理论与实验研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2013.
- [15] QIAN Kun, TANG Jun, GUO Hao, et al. Under-Coupling Whispering Gallery Mode Resonator Applied to Resonant Micro-Optic Gyroscope[J]. Sensors, 2016, 17(1): 100-109.