

谐振腔品质因数增强技术的研究

李春明, 唐 军, 张成飞, 杨江涛, 田 野, 刘 俊

(中北大学 仪器科学与动态测试教育部重点实验室, 太原 030051)

摘要: 光纤谐振腔是谐振式光纤陀螺系统的核心单元, 其品质因数直接影响陀螺的极限灵敏度。因受限于光在谐振腔内的损耗, 其品质因数常常被制约。为解决这个问题, 提出了利用掺铒光纤和 980nm 激光器实现对光在谐振腔内损耗的补偿。通过 1:9 和 1:99 耦合器制作了两个直径为 10cm 的谐振腔, 实验测试结果显示在分光比为 1:99 的耦合器下得到了最高品质因数为 1.09×10^9 的光纤谐振腔。相比于加入掺铒光纤之前的谐振腔, 品质因数提高了 7.4 倍。

关键词: 掺铒光纤; 光纤谐振腔; 品质因数

中图分类号: TN253 **文献标识码:** A **文章编号:** 1002-5561(2018)05-0017-04

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2018.05.005

Research on enhancement technique of resonator quality factor

LI Chunming, TANG Jun, ZHANG Chengfei, YANG Jiangtao, TIAN Ye, LIU Jun

(Key Laboratory of Instrumentation Science & Dynamic Measurement,

Ministry of Education, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: The fiber resonant resonator is a key device of resonant fiber optical gyro (RFOG) system, whose Q-factor influences the limited sensitivity of RFOG. Because of loss of the light in resonator, it is difficult to improve the Q-factor of resonator. To solve this problem, a compensation method is proposed by using erbium doped fiber and 980 nm laser for compensating the loss of light in resonator. Two resonant resonator with a diameter of 10cm are fabricated by the couplers of coupling ratio of 1:9 and 1:99. The performances of the fabricated resonator with the coupling ratio of 1:99 are measured and the experimental Q-factor of 1.09×10^9 . Compared with the resonator without the erbium doped fiber, the Q-factor of the proposed device is increased by 7.4 times.

Key words: erbium doped fiber; fiber resonant resonator; Q-factor

0 引言

谐振式光纤陀螺是基于 Sagnac 效应的一种高精度的角速度传感器^[1], 其主要通过检测光纤环形谐振腔的顺时针和逆时针两路光波的谐振频差, 然后利用谐振频差和旋转角速度成正比的关系, 得到待测物体的角速度。作为谐振式光纤陀螺系统的核心部件, 光纤谐振腔的品质因数直接影响了谐振式光纤陀螺的极限灵敏度^[2,3]。因此, 很多研究人员对提高谐振腔品质因数进行了研究。例如, 刘耀英等人通过优化谐振腔

的结构制造出 3.34×10^7 的环形谐振腔^[4]。Wang T J 等人利用 LiNbO_3 衬底材料制备出 5.9×10^4 高 Q 值的微环形腔^[5]。Spencer D T 等人利用 Si_3N_4 材料制备出品质因数为 8.1×10^7 的谐振腔^[6]。但是, 上述方法并不能够很好地减小腔内的损耗对于品质因数的影响。这是因为谐振腔腔内的损耗只和材料的本身属性有关, 所以无法通过优化谐振腔结构和制造材料克服损耗对光纤谐振腔品质因数的影响。

为了解决上述问题, 本文提出利用掺铒光纤的补偿机制作用来消除腔内的损耗对品质因数的影响, 进而提高谐振腔的品质因数。

1 理论分析

无源谐振腔的品质因数可由式(1)表示^[7]:

收稿日期: 2017-10-10。

基金项目: 国家自然科学基金(51635011、61571406、51727808)资助; 山西省“1331 工程”重点学科建设计划经费资助。

作者简介: 李春明(1991-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为光通信与光电子器件。

$$Q = \frac{n\pi L}{\lambda \arccos \frac{2t\alpha}{1+t^2\alpha^2}} \quad (1)$$

其中, λ 为信号光波长, t 为耦合器的透射系数, α 为环路损耗系数, n 为传输介质的折射率, L 为谐振腔的腔长。从式(1)可知,对于确定分光比的耦合器制备的谐振腔,其品质因数只和环路损耗系数有关,环路损耗系数又受限于谐振腔的腔内损耗。不含增益介质的谐振腔并不能很好地解决腔内损耗对谐振腔品质因数的限制。因此,补偿谐振腔中的损耗就成为提升谐振腔品质因数的一个重要途径。又因为 Er^{3+} 的增益窗口正好吻合谐振式光纤陀螺系统的工作波长,所以在本文中掺铒光纤被作为谐振腔的增益媒介,其补偿机理如图 1 所示^[8,9]。

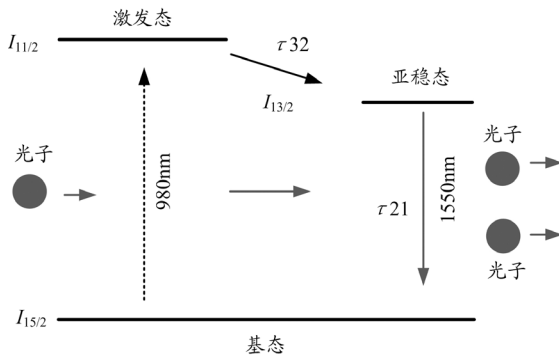


图 1 Er^{3+} 的补偿机理结构

Er^{3+} 吸收 980nm 泵浦光的能量,由基态 ($I_{15/2}$) 跃迁到激发态 ($I_{11/2}$),由于激发态上载流子的寿命很短(约为 $\tau_{32}=1\mu\text{s}$),铒离子迅速以非辐射方式弛豫到亚稳态 ($I_{13/2}$),亚稳态上载流子的存活时间约为 $\tau_{21}=10\text{ms}$,在泵浦光的不断输入下,亚稳态上的粒子不断增加,从而实现粒子数聚集。当有 1550nm 光通过掺铒光纤时,亚稳态粒子以受激辐射的方式回迁到基态,并产生与入射光同相位、同频率和同偏振态的光,从而实现光的放大,补偿光在谐振腔内的损耗。

基于上述的基本原理,含有增益介质的谐振腔模型建立如图 2 所示^[10]。

谐振腔由一个 2×2 端口的保偏耦合器、掺铒光纤 ($\text{Er}110\text{--}4/125$) 组成。其中,耦合器简化为耦合区域、直光纤和环形光纤,耦合区域又可以简化为透射系数和耦合系数 (k),并且有 $t^2+k^2=1$ 。掺铒光纤用一个增益系数 G 表示。其中, E_{i1} 和 E_{o1} 分别表示谐振腔的输入和输出光场, E_{i2} 和 E_{o2} 分别表示耦合进和耦合出环形光纤的光场, E_{i2} 沿着环形光纤传输,经过掺铒光纤,最终变成 E_{o2} 。 α 是环路损耗系数, θ 是光在谐振腔中传输相

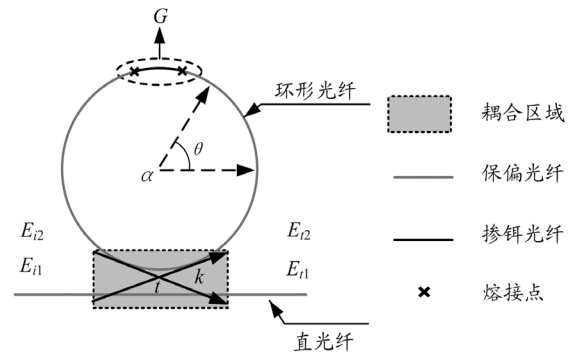


图 2 掺铒光纤谐振腔的简化模型

位变化角, $\theta=\beta L$, β 是光在介质中传播常数, L 是谐振腔的腔长。

本文利用二端口网络建模计算,可以得到掺铒光纤谐振腔的品质因数 Q_{EDF} 的表达式:

$$Q_{\text{EDF}} = \frac{n\pi L}{\lambda \arccos \frac{2t\alpha G}{1+t^2\alpha^2 G^2}} \quad (2)$$

从式(2)可知,通过改变增益系数可以直接改变谐振腔品质因数。利用 Er^{3+} 的三能级方程可以得到泵浦功率与放大倍数 $g(I_{\text{EDF}})=Q^2$ 之间的关系,如式(3)所示^[11]:

$$\begin{aligned} & [g(I_{\text{EDF}})]^\gamma \exp(-\gamma \Gamma_s \sigma_{\text{es}} N_0 L_{\text{EDF}}) = \\ & 1 - \frac{\nu_p P_s(0)}{\nu_s P_p(0)} [g(I_{\text{EDF}}) - 1] - \frac{[\ln g(I_{\text{EDF}}) + \Gamma_s \sigma_{\text{as}} N_0 L_{\text{EDF}}]}{\tau P_p(0) \Gamma_s \sigma_{\text{as}} N_0 L_{\text{EDF}}}, \\ & \gamma = \frac{\Gamma_p \sigma_{\text{ap}}}{\Gamma_s (\sigma_{\text{as}} + \sigma_{\text{es}})} \end{aligned} \quad (3)$$

其中, σ_{as} 和 σ_{es} 分别为信号光的发射与吸收截面, σ_{ap} 为泵浦光的吸收截面; Γ_s 和 Γ_p 分别为信号光或者泵浦光模场面积与光纤掺杂面积的重叠因子; ν_s, ν_p 分别表示信号光和泵浦光频率; N_0 为 Er^{3+} 粒子的掺杂浓度; $P_p(0), P_s(0)$ 分别表示输入掺铒光纤时的信号激光器的初

表 1 掺铒光纤 $\text{Er}110\text{--}4/125$ 相关特征参量

参数	参量
σ_{as}	3.84×10^{-25}
σ_{es}	2.37×10^{-25}
σ_{ap}	3.34×10^{-25}
Γ_s	0.35
Γ_p	0.6
N_0	$6.6 \times 10^{25} \text{ ions/m}^3$

始功率和泵浦激光器的初始功率; L_{EDF} 为掺铒光纤的长度。文中的掺铒光纤具体参数如表 1 所示。

结合式(2)和式(3)可知,把掺铒光纤引入到光纤谐振腔中,通过改变泵浦激光器的功率可以有效补偿谐振腔内损耗,提升谐振腔的品质因数。

2 实验

为了验证本文方法的有效性,我们搭建了如图3所示的测试平台。信号源是1550nm波长的可调谐窄线宽NKT激光器。泵浦激光器的波长为980nm、输出功率为0~402mW、输出尾纤的类型为HI-1060。掺铒光纤是Er110-4/125型光纤。波分复用器为反射式结构,光纤类型为SMF-28e。信号发生器对信号激光器进行扫描,示波器用于观测和记录数据。光从信号激光器发出,通过光隔离器,在保偏耦合器中分为两部分。一部分被耦合进入谐振腔,经过掺铒光纤的放大作用后,逆时针旋转经耦合器耦合输出,然后和直通部分一起经光电探测器转换为电信号。泵浦光经过波分复用器耦合进环形谐振腔,顺时针通过掺铒光纤,最终被掺铒光纤吸收。

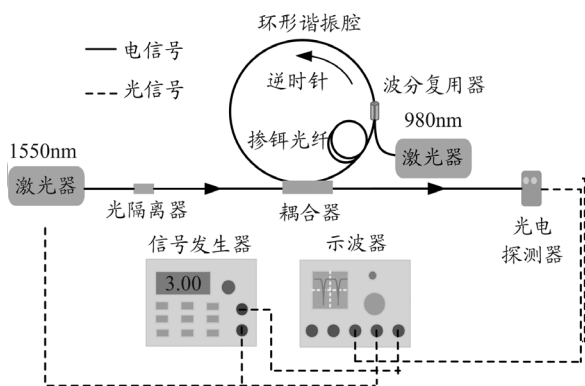


图3 测试系统结构图

图4是耦合器分光比为1:99的谐振腔在一个电压扫描周期的测试结果图,从图中可知,随着泵浦功率的增加,谐振曲线的半高全宽越来越小。同时,光电

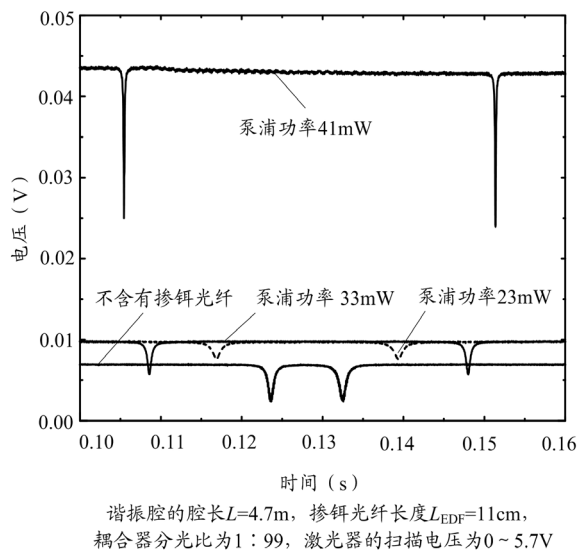


图4 耦合器分光比为1:99的谐振腔在一个电压扫描周期的测试结果

探测器上探测到的最大电压值开始能够保持基本不变,这是因为掺铒光纤放大的光不足以补偿光在谐振腔的损耗;一旦泵浦功率超过某个阈值,最大的电压值就会变大,这是因为随着泵浦功率的增加,掺铒光纤所能提供的增益变大,使放大后的光通过耦合器到达光电探测器,引起最大电压值的变化。相比于没有掺铒光纤的谐振腔,由于泵浦功率的增大,含有掺铒光纤的谐振腔中产生了受激布里渊噪声,造成谐振曲线的波动,如图4中泵浦功率为41mW曲线所示。

图5是耦合器分光比为1:9时在一个扫描周期的谐振腔测试结果图,从图中可知,随着泵浦功率的增加,谐振曲线的线宽越来越窄,并且谐振曲线的最大值越来越大。这是由于掺铒光纤提供的增益变大,造成到达光电探测器的光功率越来越大。相比较于不含有掺铒光纤的谐振腔的品质因数,初始状态下含有掺铒光纤的谐振腔谐振曲线最大电压值要小。这是由于

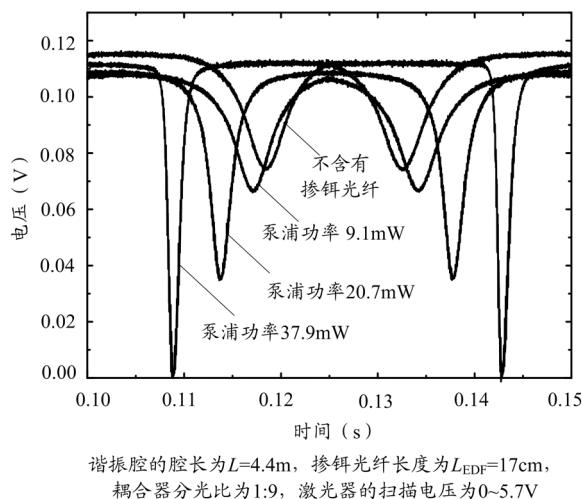


图5 耦合器分光比为1:9时在一个扫描周期的谐振腔测试结果

掺铒光纤熔接进谐振腔后会引入损耗。在泵浦功率较低时,还不足以克服这个损耗带来的影响,一旦泵浦功率超过一定的阈值,引入的损耗产生的负面影响就会被克服。

根据图4和图5测量的谐振曲线,光纤谐振腔的品质因数测试结果如图6所示,除左下角方框中的点外,其它点都是含有掺铒光纤的谐振腔的品质因数。虚线曲线表示分光比为1:9的谐振腔品质因数的变化;实线曲线表示分光比为1:99的谐振腔品质因数的变化。从图6中可以看出,随着泵浦功率的增大,含有掺铒光纤的谐振腔品质因数逐渐增大。在直径为10cm和耦合器分光比为1:9的情况下,含有掺铒光纤谐振腔的最优品质因数为 9.75×10^7 。在直径为10cm和耦合

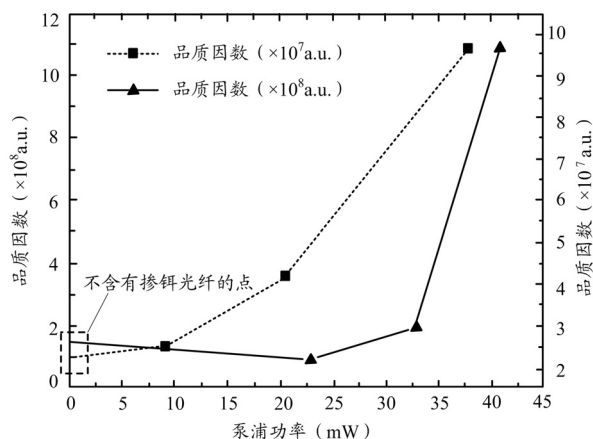


图6 测试结果

器分光比为 1:99 的情况下,含有掺铒光纤谐振腔的最优品质因数为 1.09×10^9 。实验结果显示,相比于加入掺铒光纤之前,不同分光比的谐振腔的品质因数分别提高了 7.4 倍和 4.3 倍。

3 结束语

本文提出了利用掺铒光纤和 980nm 激光器,通过改变泵浦激光器的功率补偿谐振腔的腔内损耗,提升谐振腔的品质因数的方法。为了便于分析含有掺铒光纤的谐振腔,推导了其品质因数的表达式,理论分析了增益补偿的可行性。实验结果显示:相比于不含有掺铒光纤的谐振腔,分光比为 1:99 和 1:9 的光纤谐振

腔的品质因数分别提高了 7.4 倍和 4.3 倍,证明本文提出的掺铒光纤补偿机制的可行性。

参考文献:

- [1] 林之华,李朝锋,刘甲春. 光纤传感技术及其军事应用 [J]. 光通信技术, 2011, 35(7): 4-6.
- [2] FENG L S, WANG J J, ZHI Y Z, et al. Transmissive resonator optic gyro based on silica waveguide ring resonator [J]. Opt. Express, 2014, 22(22): 27565-27575.
- [3] 刘建华,唐军,商成龙,等. 面向谐振式微光学陀螺应用的球形谐振腔 DQ 乘积优化[J]. 物理学报, 2015, 64(15): 154206-1-154206-8.
- [4] 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): 3688-3693.
- [5] WANG T J, CHEN P T, HSIAO W C, et al. High-Q LiNbO₃ Microtoroid Resonators [J]. Journal of Light wave Technology, 2016, 34 (14): 3306-3311.
- [6] SPENCER D T, BAUTERS J F, HECK M J R, et al. Integrated waveguide coupled Si₃N₄ resonators in the ultrahigh-Q regime [J]. Optica, 2014, 1 (3): 153-157.
- [7] 钱坤,唐军,刘俊,等. 高 Q 平面集成光波导谐振腔[J]. 微纳电子技术, 2017, 54(5): 319-323.
- [8] 陈琳,徐军,邵晓鹏,等. 掺铒光纤放大器增益和噪声研究[J]. 光通信研究, 2006, 32(1): 52-55.
- [9] 刘建龙,孙继斌,田久华. 掺铒光纤放大器[J]. 大气与环境光学学报, 1993, 27(4): 15-16.
- [10] 邹长铃,董春华,崔金明,等. 回音壁模式光学微腔:基础与应用[J]. 中国科学, 2012, 42(11): 1155-1175.
- [11] 杜戈果,陈国夫. 980nm 泵浦掺铒光纤放大器增益特性的理论研究 [J]. 中国科学, 1998, 41(6): 535-541.

参考文献著录规则(一)——总要求及图书的著录格式

◆总要求:

为了帮助向本刊投稿的作者按规范著录参考文献,现将常见类型文献的著录格式作如下介绍。

参考文献中的责任者采用姓在前名在后的著录形式。无论中外人士一律姓在前名在后;外国著者的“名”可以用缩写字母,“姓”全部大写,“姓”和缩写的“名”之间勿用“.”,而是空格。如原文中作者为“P. S. 昂温”则在本刊要求中应写成“昂温 P S”,Albert Einstein Seny 应写成 EINSTEIN A S。参考文献的责任者不超过 3 位时,全部照录。超过 3 位时,只著录前 3 位责任者,其后加“等”或与之相应的词。

不同的文献类型均有相应的标志代码:[M]为普通图书,[C]为会议录,[G]为汇编,[N]为报纸,[J]为期刊,[D]为学位论文,[R]为报告,[S]为标准,[P]为专利,[Z]为其它未说明的文献。

◆原著的著录格式:

[序号] 著者. 书名[M]. 版本(1 版不著录). 出版地:出版者,出版年:起-止页码。

[1] 原 荣. 光纤通信[M]. 北京:电子工业出版社,2002.

[2] CRAWFORD GORMAN M. Future libraries: dreams, madness, & reality[M]. Chicago: America Library Association, 1995.

◆译著的著录格式:

[序号] 著者. 书名[M]. 译者,译. 出版地:出版者,出版年:起-止页码。