

# 谐振式硅基二氧化硅集成光学陀螺的克尔噪声研究

于怀勇<sup>1</sup> 张春熹<sup>1,2</sup> 冯丽爽<sup>1,2</sup> 洪灵菲<sup>1</sup> 王俊杰<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>北京航空航天大学仪器科学与光电工程学院, 北京 100191  
<sup>2</sup>北京航空航天大学微纳测控与低维物理教育部重点实验室, 北京 100191)

**摘要** 分析了集成光学谐振式陀螺中克尔噪声的产生机理,利用导波光学理论建立了克尔噪声的数学模型,并基于此模型得出了克尔噪声对集成光学陀螺极限灵敏度影响的数学表达。分析了不同光源谱宽下谐振腔腔长与克尔噪声引起陀螺输出偏移之间的关系;针对集成光学陀螺中克尔噪声的主要产生原因-谐振腔中顺、逆时针的光强不平衡,仿真分析了系统中集成光学调制器的Y分支波导分光比不平衡对陀螺输出的影响,给出了集成光学陀螺中克尔噪声的抑制方法,最后给出了实验装置并采用通过可变衰减器的方法调节入射到谐振腔的光强使两光路光强严格相等,有效地抑制克尔噪声,并给出了初步实验结果。

**关键词** 集成光学;光学噪声分析;导波光学;克尔效应

**中图分类号** TH74; TN25; TN256 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS201131.1013003

## Research on Kerr-Effect-Induced Noise of Integrated Optical Gyroscope Based on Silicon on SiO<sub>2</sub> Waveguide Resonator

Yu Huaiyong<sup>1</sup> Zhang Chunxi<sup>1,2</sup> Feng Lishuang<sup>1,2</sup> Hong Lingfei<sup>1</sup> Wang Junjie<sup>1</sup>

<sup>1</sup>School of Instrumentation Science and Opto-Electronics Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China  
<sup>2</sup>Key Laboratory of Micro-Nano Measurement-Manipulation and Physics, Ministry of Education, Beihang University, Beijing 100191, China

**Abstract** The principle of Kerr noise is analyzed in the integrated optical resonator gyroscope (IORG), and the mathematical model is built by the theory of guided-wave optics, the relation of the fundamental detection limit caused by the Kerr noise  $\Omega_k$  is formulated. Furthermore, the curve of resonator length with  $\Omega_k$  under different spectrum line widths of laser is simulated. As to the prominent reason of Kerr noise in the IORG which is the unbalance splitting ratio of integrated optical modulation, the calculation and software simulation are carried out. After that, the suppression methods to eliminate the Kerr noise are put forward. Finally, the experimental setup is built up and by adjusting the adjustable attenuator the equal optical intensity is realized, which shows that the Kerr noise in the IORG is effectively suppressed simultaneously.

**Key words** integrated optics; optical noise analysis; guided-wave optics; Kerr effect

**OCIS codes** 130.3120; 190.3270

## 1 引言

集成光学陀螺(IORG)作为一种新型的惯性角速度传感器,凭借其体积小、重量轻的优势,成为目前惯性系统研究的重点之一<sup>[1]</sup>。它是在光纤陀螺发

展的基础上发展起来的,继承了光纤陀螺诸如结构全固态、重力不敏感、启动速度快和使用寿命长等优点,并通过集成光学技术和微加工工艺制备单片集成的光学谐振腔,取代了光纤环,减小了系统光路的

收稿日期: 2011-04-22; 收到修改稿日期: 2011-05-13

基金项目: 国家自然科学基金(50875015)资助课题。

作者简介: 于怀勇(1982—),男,博士研究生,主要从事集成光学传感技术方面的研究。

E-mail: yuhuaiyong@aspe.buaa.edu.cn

导师简介: 张春熹(1964—),男,教授,博士生导师,主要从事光纤传感技术及光学惯性技术等方面的研究。

E-mail: zhangchunxi@aspe.buaa.edu.cn

体积,在一定程度上实现了器件集成,降低了系统成本,易于实现产品的规模化生产。在中、低精度的战术级、速率级军用领域和汽车导航、机器人姿态控制和石油勘探等民用领域有着广泛的应用前景<sup>[2]</sup>。美国国防高级研究计划局(DARPA)把微惯性制导技术列在了首位。根据2008年美国DRAPER实验室对远期惯性器件发展趋势的最新预测,IORG和微机电(MEMS)陀螺将占领包括导航领域、战术领域、商用领域及稳定和控制领域在内的整个低、中精度领域。但由于MEMS陀螺中结构上存在活动部件,使其动态性能和寿命受到严重影响,同时所采用的电容读出方式大大制约了MEMS陀螺技术发展。而IORG基于光学效应,有效地结合了光学陀螺的全固态和MEMS陀螺的微纳轻小型结构,可应用于运载武器、空间站等特殊环境领域等优势,IORG成为微小型惯性仪表技术的重要发展方向。

IORG技术在国内得到了广泛的方展,许多研究单位提出了很多技术方案<sup>[3~10]</sup>,并成功研制出

了各种类型的陀螺样机,但是其整体性能不高,距离实用化尚存在一定差距。总结来看,限制其精度提高的主要原因在于其陀螺系统中存在偏振波动、瑞利背向散射、克尔效应等噪声的影响。本文重点分析了IORG克尔效应误差的产生机理,理论分析计算了谐振式IORG的克尔噪声对不同精度谐振式IORG的影响,并通过分析计算给出了IORG减弱克尔噪声的方法。

## 2 IORG的整体结构

谐振式IORG采用微纳加工技术制作波导谐振腔,在设计过程中考虑反射式谐振腔的输出信号是亮背景下的暗条纹,而透射式谐振腔的输出信号是暗背景下亮条纹。由于反射式谐振腔的信噪比较高,该方案采用反射式谐振腔结构。在信号检测方面,采用灵敏度高、动态范围大的闭环信号方案。其系统示意图如图1所示。

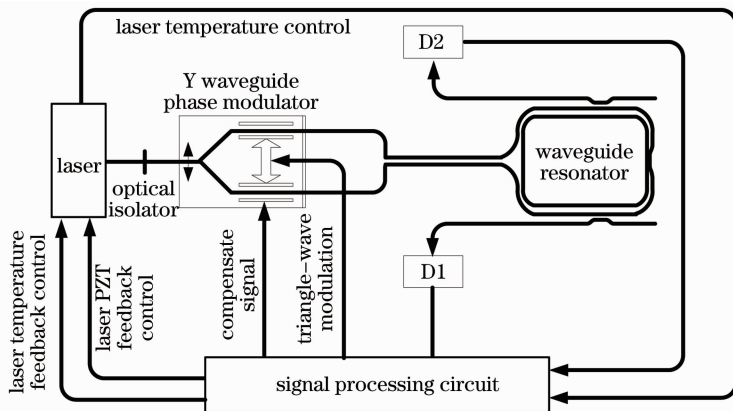


图1 系统总体方案图

Fig. 1 Scheme of IORG system

采用双频率调制的信号检测方案,对图1中经过集成光学调制器的两路光进行三角波调制。检测电路对探测器D1得到的信号进行处理,产生反馈信号,调节激光光源频率 $f_s$ ,使经过集成光学调制器上端分支的激光频率 $f_s$ 与谐振腔逆时针(CCW)的谐振频率一致;同时数字电路对探测器D2得到的信号进行处理,产生反馈信号,对Y波导另一路光进行三角波和补偿信号组合调制,产生移频量 $f_{com}$ ,使光频率 $f_s + f_{com}$ 等于谐振腔的顺时针(CW)谐振频率。频率 $f_{com}$ 就是萨格奈克(Sagnac)效应引起的谐振频率差,由此可得出谐振腔的转动角速度 $\Omega$ :

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

式中 $A$ 为谐振腔的面积, $n$ 为波导的折射率, $\lambda$ 为输

入光波长, $L$ 为谐振腔长度, $L'$ 为光程, $4A/(\lambda L')$ 为陀螺的标度因子。

## 3 IORG中的克尔效应分析

### 3.1 IORG中克尔噪声的产生机理及影响因素

光学克尔效应是一种非线性光学效应,所谓非线性效应就是光在传播过程中会不满足独立传播原理和叠加原理,并产生新的频率以及不同频率的光波之间产生耦合。克尔效应的产生原因主要是传输媒质中光强的不均匀分布引起的交叉相位调制<sup>[11,12]</sup>。IORG中的克尔效应是由沿CW和CCW方向传播的两束光光强不平衡引起的波导折射率波动造成的。如果谐振腔中相向传播光波的功率不平

衡,就会产生一个非互易的频率差,从而使系统输出出现零漂。IORG 系统光路中 CW 与 CCW 方向的克尔效应分别表示为

$$n_{cw(ccw)} = n_0 + \alpha n_1 P_{cw(ccw)} / S_{eff}, \quad (2)$$

式中  $n_0$  为波导正常折射率,  $n_1$  为波导的非线性折射率系数,  $P_{cw}, P_{ccw}$  分别为顺、逆时针光功率,  $\alpha$  为偏振因子 ( $2/3 \leq \alpha \leq 1$ ),  $S_{eff}$  为波导有效截面积。

将(2)式中  $n_{cw}$  与  $n_{ccw}$  求差,求得折射率波动  $\delta n$  为

$$\delta n = n_0 + \alpha n_1 \delta P / S_{eff}, \quad (3)$$

由(3)式可以得到,克尔效应对陀螺系统的影响与谐振腔中 CW 和 CCW 方向传输光波之间的光功率差成正比;当两光束的输入功率相等时,式中右侧第二项为零,克尔效应对波导折射率的影响为零,克尔效应引起的陀螺系统输出偏差为零。

图 2(a) 给出了谐振式 IORG 的光路核心部件-硅基二氧化硅谐振腔的结构示意图<sup>[13]</sup>,同时给

出了光路传输途径;图 2(b) 给出了陀螺光路的实验实物图。从光源发出的光经隔离器进入集成光学调制器,经调制器分光后,分别从图 2(a) 中的光输入端 1 和光输入端 2 进入耦合器 C1 和 C2,而后分别从耦合器 C3 的上输入端和下输入端进入谐振腔。在此过程中引入顺、逆时针输入光强差的因素主要有:1)集成光学调制器的分光比非理想的 1:1,此部分为工艺引起工艺误差,可通过改进加工工艺来不断地改善,目前其两臂的分光比误差能够控制在 0.008 以内;2)尾纤与波导耦合效率之间的差异(两输入端耦合效率差,两输出端耦合效率差):此部分误差为非重复性误差,可以通过重新耦合进行抑制;3)腔内耦合器 C3 的耦合比差异。腔外耦合器 C1,耦合器 C2 可以通过监测其异侧尾端输出光强得到分光比差异;反向耦合比可以改变光输入端来得到。

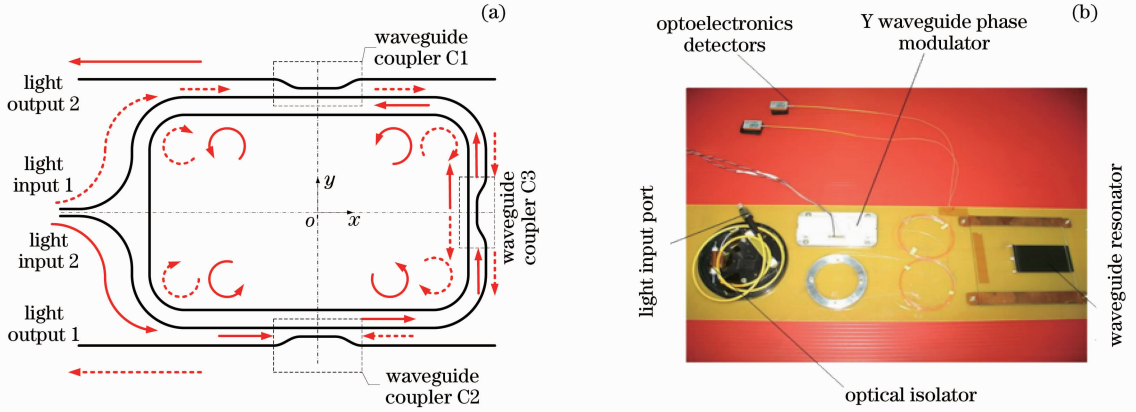


图 2 硅基二氧化硅波导谐振腔及 IORG 光路结构。(a) 谐振腔结构示意图; (b) 谐振式 IORG 光路实物图  
Fig. 2 Optical transmission of silicon dioxide on silicon substrate waveguide resonator and the optical structure of IORG. (a) Scheme of waveguide resonator; (b) photo of resonant IORG

### 3.2 克尔噪声的数学模型

谐振式 IORG 的系统示意图如图 1 所示,两束相向传播光的克尔效应引起传播常数  $\Delta\beta_{kcw}, \Delta\beta_{kccw}$  的变化可分别表示为<sup>[14~16]</sup>

$$\Delta\beta_{kcw(kccw)} = \frac{2\omega\eta n_2}{cS_{eff}} [I_{cw(ccw)} + 2I_{ccw(cw)}], \quad (4)$$

式中  $I_{cw}, I_{ccw}$  分别表示两束相向传播光的光强,  $\eta, S_{eff}, n_2$  和  $c$  分别表示波导的阻抗、光能量集中的区域有效面积、克尔系数和真空中的光速。(4)式中如果  $I_{cw} \neq I_{ccw}$ , 则  $\Delta\beta_{kcw} \neq \Delta\beta_{kccw}$ , 陀螺系统输出将出现非线性波动。

在谐振器中两束反向传播光  $I_{cw}(t, z)$  和  $I_{ccw}(t, z)$  可给出为<sup>[17]</sup>

$$I_{cw}(t, z) = \frac{\rho}{1 - t_f^2} \Gamma(B_{cw} + \varphi_{kcw}) \cdot \exp(-\alpha_r z) \exp(-\alpha_c) R_a I_0, \quad (5)$$

$$I_{ccw}(t, z) = \frac{\rho}{1 - t_f^2} \Gamma(B_{ccw} + \varphi_{kccw}) \cdot \exp[-\alpha_r(L - z)] \exp(-\alpha_c) R_b I_0, \quad (6)$$

式中

$$\rho = \frac{(1 - r^2)[1 - R' \exp(-2\pi\Delta f\tau_0)](1 - t_f^2)}{[1 - R' \exp(-2\pi\Delta f\tau_0)]^2 (1 - R'^2)}, \quad (7)$$

$$R' = r t_f, \quad (8)$$

$$\Gamma(x) =$$

$$\frac{[1 - R' \exp(-2\pi\Delta f\tau_0)]^2}{1 - 2R' \exp(-2\pi\Delta f\tau_0) \cos x + [R' \exp(-2\pi\Delta f\tau_0)]^2}, \quad (9)$$

$$B_{cw} = \omega\tau_0 + \vartheta_{om} \sin mt - 2m'\pi, \quad (10)$$

$$B_{ccw} = \omega\tau_0 + \vartheta_{on} \sin nt - 2n'\pi, \quad (11)$$

式中  $\alpha_c, r, \Delta f$  和  $I_0$  分别表示耦合器中的损耗、不包括损耗的耦合系数、光源谱宽以及与  $E_0$  相应的光源能量。 $R_a$  和  $R_b$  是集成光学调制器的分光系数; CW 和 CCW 方向光的克尔效应导致的漂移分别表示为  $\varphi_{kcw}$  和  $\varphi_{kccw}$ , 信号光在波导谐振腔的渡越时间为  $\tau_0$ ;  $t_f, L$  分别为谐振腔耦合器透射率, 谐振腔长度。

$\vartheta_{om} \sin mt, \vartheta_{on} \sin nt$  分别表示由信号处理单元给出的对集成光学调制器两臂的频率调制, 其主要作用是调整谐振工作点。由于调制频率  $m$  和  $n$  远比  $1/\tau_0$  要低, 在振荡部分中可忽略渡越时间  $\tau_0$ 。

以上推导中, 为简化模型假设谐振腔中的两束反向传播光有同样的偏振线性度。由(4)~(6)式得到  $\Delta\beta_{kcw}$  和  $\Delta\beta_{kccw}$  分别表示为

$$\Delta\beta_{kcw}(z) = \frac{2\omega\eta n_2}{cS_{eff}} \frac{\rho}{1-t_f^2} \exp(-\alpha_c) I_0 \{R_a \Gamma(B_{cw} + \varphi_{kcw}) \exp(-\alpha_t z) + 2R_b \Gamma(B_{ccw} + \varphi_{kccw}) \exp[-\alpha_t(L-z)]\}, \quad (12)$$

$$\Delta\beta_{kccw}(z) = \frac{2\omega\eta n_2}{cS_{eff}} \frac{\rho}{1-t_f^2} \exp(-\alpha_c) I_0 \{R_b \Gamma(B_{ccw} + \varphi_{kccw}) \exp[-\alpha_t(L-z)] + 2R_a \Gamma(B_{cw} + \varphi_{kcw}) \exp(-\alpha_t z)\}, \quad (13)$$

式中  $\alpha_t$  为波导的损耗系数。由克尔效应引起的漂移  $\varphi_{kcw}$  和  $\varphi_{kccw}$ , 等于  $\Delta\beta_{kcw}$  和  $\Delta\beta_{kccw}$  对  $z$  沿波导腔的积分:

$$\varphi_{kcw(kccw)} = \int_0^L \Delta\beta_{kcw(kccw)} dz = \delta \{R_{a(b)} \Gamma[B_{cw(ccw)} + \varphi_{kcw(kccw)}] + 2R_{b(a)} \Gamma[B_{ccw(cw)} + \varphi_{kccw(kcw)}]\}, \quad (14)$$

式中

$$\delta = \frac{2\omega\eta n_2}{cS_{eff}(1-t_f^2)} \frac{1 - \exp(-\alpha_t L)}{\alpha_t} \rho \exp(-\alpha_c) I_0. \quad (15)$$

系统中探测器 D1 和 D2 处的光强分别为

$$I_{1(2)} = \{1 - \rho \Gamma[B_{cw(ccw)} + \varphi_{kcw(kccw)}]\} R_{a(b)} \exp(-\alpha_c) I_0, \quad (16)$$

考虑(16)式中  $\Gamma$  的谐振特性, 在稳频工作点下满足

$$B_{cw(ccw)}^0 + \varphi_{kcw(kccw)}^0 = 0, \quad (17)$$

式中  $B_{cw}^0, B_{ccw}^0, \varphi_{kcw}^0$  和  $\varphi_{kccw}^0$  分别是  $B_{cw}, B_{ccw}, \varphi_{kcw}$  和  $\varphi_{kccw}$  的直流分量, 进而可得

$$B_{cw}^0 = -\delta [R_a \overline{\Gamma(\vartheta_{om} \sin mt)} + 2R_b \overline{\Gamma(\vartheta_{on} \sin nt)}], \quad (18)$$

$$B_{ccw}^0 = -\delta [R_b \overline{\Gamma(\vartheta_{on} \sin nt)} + 2R_a \overline{\Gamma(\vartheta_{om} \sin mt)}], \quad (19)$$

式中上划线表示时间平均。由 Sagnac 效应  $\Delta f = (4A/n\lambda L)\Omega_k$ , 及  $(B_{cw}^0 - B_{ccw}^0) = 2\pi\Delta f\tau$  推导出克尔效应引起的漂移  $\Omega_k$  为

$$\Omega_k = \frac{c\lambda}{8\pi A_{wr}} (B_{cw}^0 - B_{ccw}^0) \approx \frac{c\lambda\delta}{8\pi A_{wr}} \left[ (R_a - R_b) + \frac{\sqrt{2R_f}}{1-R_f} (\vartheta_{om} - \vartheta_{on}) \right], \quad (20)$$

式中  $A_{wr}$  表示谐振腔的有效面积(即若谐振腔的波导为  $M$  圈, 则有效面积应该为  $M$  乘以单圈面积), (20) 式表明克尔噪声引起的漂移  $\Omega_k$  不仅与分光系

数  $R_a$  和  $R_b$  之差  $\Delta R$  有关, 还与两个反向传播光的调制指数差  $\Delta\vartheta$  有关。

### 3.3 克尔噪声对陀螺极限灵敏度的影响

克尔效应在 IORG 中主要与 4 个因素密切相关: 光源谱宽、谐振腔的长度、集成光学调制器的分光比和波导的单位损耗, 分别对其进行仿真分析。

图 3 给出了谐振腔在腔长确定 0.127 m, 光源谱宽  $\Delta f$  分别为 3 kHz, 300 kHz, 30 MHz 和 3 GHz 的情况下, 谐振腔单位损耗与克尔噪声引起的漂移  $\Omega_k$  之间的关系曲线。可得在腔长确定的条件下, 波导的单位损耗越大, 克尔噪声引起的偏差  $\Omega_k$  越小, 且克尔噪声随着光源谱宽的增大减小。本方案为谐振式 IORG, 其原理性质决定了其必须采用窄线宽激光光源(线宽小于 1 MHz), 而且通过仿真确定当光源谱宽小于 1 MHz 后, 由光源谱宽引入的  $\Omega_k$  已经变化不大, 因此选用线宽小于 1 MHz 的光源可满足要求。

图 4 为光源线宽在 30 kHz, 不同谐振腔长度下, 谐振腔的单位损耗与克尔噪声引起的偏差  $\Omega_k$  之间的关系。由图可知, 谐振腔长度的增加会大大减少系统克尔噪声的影响, 但是受目前微纳米加工技术的限制, 硅基二氧化硅波导谐振腔只能在 4 inch 或 5 inch (1 inch = 2.54 cm) 的硅片实现平面加工, 因此获得长度较长的硅基二氧化硅波导谐振腔还比较困难, 正处于不断的研究当中。

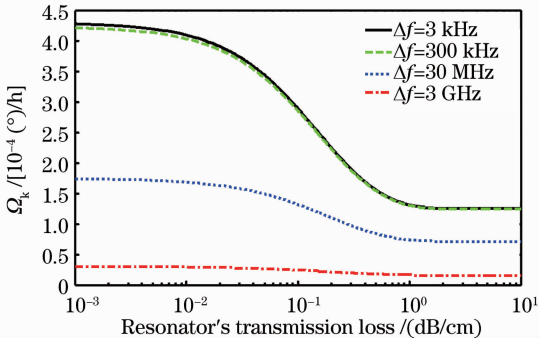


图3 不同光源谱宽下,谐振腔单位损耗与 $\Omega_k$ 之间的关系  
Fig. 3 Relation between  $\Omega_k$  and resonator's loss under different laser's linewidths

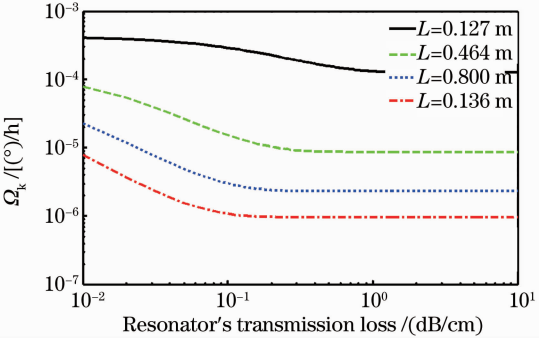


图4 不同谐振腔腔长下,谐振腔单位损耗与 $\Omega_k$ 之间的关系  
Fig. 4 Relation between  $\Omega_k$  and resonator's loss under different waveguide resonator lengths

根据陀螺极限灵敏度 $\Omega_{\min}$ 的定义式, $\Omega_{\min}$ 与谐振腔的腔长成近似反比关系,在波导单位损耗一定的条件下,谐振腔的长度决定了其极限灵敏度。图5给出了光源谱宽为30 kHz,300 kHz,3 MHz和3 GHz 4种情况下( $\Delta R = 10^{-4}$ ,  $\Delta\vartheta = 0$ ),谐振腔腔长与克尔噪声引起的系统输出漂移的关系曲线。可以看出随着谐振腔腔长的增加,克尔噪声引起得陀螺输出漂移先增加再减小。腔长在0.5 m附近时,克尔噪声引起的偏差最大;腔长大于7 m后,克尔

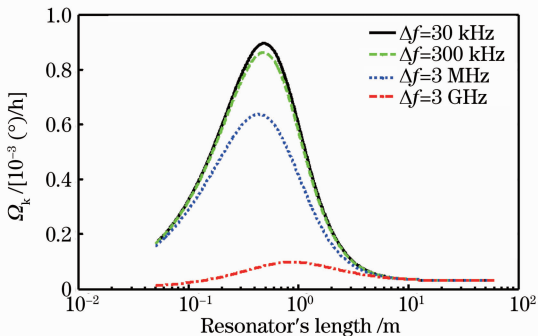


图5 不同光源谱宽下谐振腔腔长与 $\Omega_k$ 之间的关系  
Fig. 5 Relation between the  $\Omega_k$  and resonator's length

噪声引起的 $\Omega_k$ 趋于稳定。此外,当光源谱宽小于300 kHz时,克尔噪声引起的陀螺漂移已经差别不大,减少光源线宽已经对克尔噪声改进没有很大影响。

谐振腔中顺、逆时针的光强不均衡是引起集成光学陀螺中克尔非线性效应的主要原因,本文中Y分支波导的非理想对称分光引起顺、逆时针光强不均衡的主要原因之一。为了定量确定分光比引起的克尔噪声的影响,图6给出了4种不同谐振腔腔长下[0.127(本文中的设计的谐振腔),1,10和100 m]对应的克尔噪声的偏移。当腔长为0.127 m,顺逆时针方向的分束比之差等于0.27时,克尔噪声的偏差为 $1.6^\circ/\text{h}^{[18]}$ ,即系统极限灵敏度;在实际加工中,集成光学调制器分光比引起的顺逆时针方向的分束比之差能够控制在0.008以内(本文陀螺样机系统中集成光学调制器的分束比:49.6%:50.4%),此时克尔噪声的偏差为 $0.06^\circ/\text{h}$ [即 $1.67 \times 10^{-5}^\circ/\text{s}$ ],在此IORG原理样机中可以忽略克尔噪声的影响。

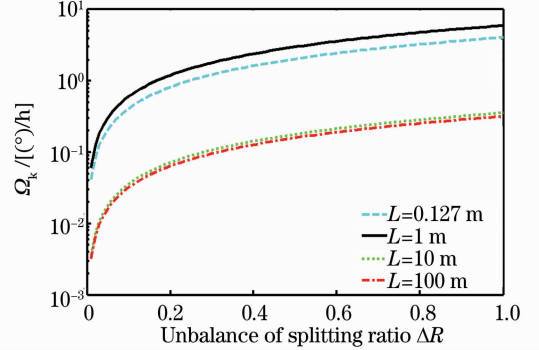


图6 CW与CCW分光比差异与输出Kerr漂移 $\Omega_k$ 之间的关系  
Fig. 6 Relation between Kerr drift of output  $\Omega_k$  and unbalance of splitting ratio of CW and CCW

由此可见,对于低精度的谐振式集成光学陀螺,克尔噪声引起的偏移远低于系统散粒噪声引起的偏移,因而没有必要采取复杂的克尔噪声抑制措施;而对于高精度导航级集成光学陀螺,必须采取特殊措施来抑制。

## 4 克尔噪声抑制方法研究

克尔噪声抑制实验装置采用如图1所示,为简单起见,假定谐振腔渡越时间 $\tau_0$ 为强度调制周期 $T_1$ 的整数倍:

$$NT_1 = \tau_0, \quad (21)$$

式中 $N$ 是整数。强度调制的漂移 $\varphi_{\text{kew}}(t)$ 和 $\varphi_{\text{kccw}}(t)$ 为



$$\varphi_{\text{kew}(\text{kccw})}(t) = \delta' L \{ R_{\text{a}(\text{b})} \Gamma [ B_{\text{cw}(\text{ccw})} + \varphi_{\text{kew}(\text{kccw})} ] I_0(t) + 2R_{\text{b}(\text{a})} \Gamma [ B_{\text{ccw}(\text{cw})} + \varphi_{\text{kccw}(\text{kew})} ] \overline{I_0(t)} \}, \quad (22)$$

式中

$$\delta' = \frac{2\omega\eta n_2}{cA} \frac{\rho}{1-t_f^2} \exp(-\alpha_c), \quad (23)$$

$I_0(t)$  表示光源调制后的强度。假定在谐振腔中回转一周的损耗可以忽略。 $\overline{I_0(t)}$  为  $\varphi_{\text{kew}}(t)$  和  $\varphi_{\text{kccw}}(t)$  的强度平均值, 即频率调制后产生的漂移可分别表示为

$$\tilde{\varphi}_{\text{kew}(\text{kccw})}^0 = \frac{\varphi_{\text{kew}(\text{kccw})}(t) I_0(t)}{\overline{I_0(t)}}, \quad (24)$$

从而, 陀螺仪的漂移可由(17)式和(24)式导出

$$\Omega_k = \frac{c\lambda\delta'}{4\pi a} \left( \Delta R + \frac{\sqrt{2R_f}}{1-R_f} \Delta\vartheta_0 \right) \frac{\overline{I_0^2(t)} - 2\overline{I_0(t)}^2}{\overline{I_0(t)}}. \quad (25)$$

由(25)式可以看出, 采用3种方法可以抑制陀螺中的克尔噪声:

1) 顺、逆时针的光功率严格等值, 即( $\Delta R=0$ )。这对于在复杂的温度环境中使用的惯性级和导航级陀螺来说, 其分束器的分光比要严格的控制在( $0.5 \pm 10^{-4}$ )才能满足要求<sup>[15]</sup>。这对加工工艺提出了很高的要求, 就目前的加工来看, 要在 $-40\text{ }^\circ\text{C} \sim 60\text{ }^\circ\text{C}$ 范围内实现该指标非常困难。

2) 对顺、逆时针的光波同时进行高频强度调制, 由(25)式可知, 消除克尔噪声的条件是要该式中的分子项 $\overline{I_0^2(t)} - 2\overline{I_0(t)}^2$  为零, 这就需要有一个占空比为50%且调制频率远大于光源本征频率的调制信号。

3) 选择合适的光源。大谱宽光源能够有效地消除克尔噪声驻波的对比如度, 减少系统的克尔噪声。但是, 谐振式陀螺本身要求高相干性的窄谱光源, 这就出现了矛盾。因此, 在实际的系统设计中, 需要取一个折中的值以使系统的极限灵敏度达到最大。

综上所述, 在谐振式 IORG 中单独采取上述3种方案中的某一种都不能有效抑制克尔噪声。由于 IORG 系统的谐振式工作原理, 第三种方案显然是不可行的。第一种方案要求两束光功率严格相等, 实际加工制作分光比可以控制在0.01左右, 对于低精度[大于 $1\text{ }^\circ/\text{h}$ ]的集成光学陀螺可以满足要求, 对于中、高精度集成光学陀螺[小于 $1\text{ }^\circ/\text{h}$ ]需要采用方波调制的方法来进行抑制。第二种方案, 对于线圈较长, 特征频率较低的集成光学陀螺是行之有效的, 但对于设计的谐振式陀螺系统腔长为0.127 m, 特征频率为1.62 GHz来说其调制频率至少为3.24 GHz, 需采用射频调制, 这无疑大大增加了系统的复杂度。实际上前面已经提到, 该系统的

克尔噪声偏移小于其极限灵敏度, 对中低精度的 IORG 可以忽略克尔噪声影响。

根据克尔效应的产生机理, 电路上一般采取数字调制补偿措施, 主要有两种方式: 方波调制法<sup>[15]</sup>和正弦波调制法。

方波调制方法是将输入光波用占空比为50%, 调制频率为自由光谱范围(FSR)整数倍的方波进行调制。其原理是由 $\varphi_{\text{kew}}$ 和 $\varphi_{\text{kccw}}$ 引起的探测器的瞬时输出信号正比于探测器光强的权值平均,  $\varphi_{\text{kew}}$ 和 $\varphi_{\text{kccw}}$ 的光强权值平均为由(24)式给出, 结合(25)式得出当调制方波的占空比为1:1时, 即满足条件:

$$\begin{cases} \overline{I_0^2(t)} = \frac{I_0^2}{2} \\ \overline{I_0(t)} = \frac{I_0}{2} \end{cases}, \quad (26)$$

此时(25)式等于零, 即由克尔效应引起的陀螺输出偏差为零, 有效地消除了克尔效应的影响。正弦波调制是采用低频正弦波(角频率为 $k$ )对进入谐振腔的光波强度进行调制; 并对调制频率进行同步检测, 得到克尔效应引起的偏移, 即输入谐振腔的两束光波的光强差, 并将其通过闭环控制环路反馈到谐振腔中的一束光波中去, 使平均光强差为零, 从而实现克尔噪声的滤除<sup>[16]</sup>。解调输出的信号可以表示为

$$h(t) = C(f_n + f_k + f_n C_2 \sin \theta + 2f_k C_2 \sin \theta - f_k C_2^2 \cos^2 \theta), \quad (27)$$

式中 $\theta = (kt + \phi_k)$ ,  $C, C_2$  为常数,  $f_n$  为谐振点的偏差,  $f_k$  为克尔效应引起偏差,  $\varphi_k$  为强度调制的角频率。采用闭环方案时, (27)式中的第三项相对于四项可以忽略, 即反馈量中可以视为仅包含克尔效应的偏差量的反馈, 所以通过此方法可以将克尔效应造成的偏差滤除。

## 5 实验验证

经分析计算得, 要获得极限灵敏度小于 $0.001\text{ }^\circ/\text{h}$ 的光学陀螺其谐振器长度应该大于10 m, 本文采用10 m熊猫保偏光纤搭建了实验装置, 其实验装置示意图如图7所示。

图7中为典型的 IORG 光路, 通过在集成光学调制器后加一可调衰减器, 调节输入谐振腔的光强使其光功率相等, 测试结果如图8所示。当输入光强为零时, 两探测器(D1和D2)的输出负偏压均为 $-1.58\text{ V}$ , 探测器的光电转换效率为 $0.95\text{ A/W}$ , 跨阻为 $40\text{ k}\Omega$ 。

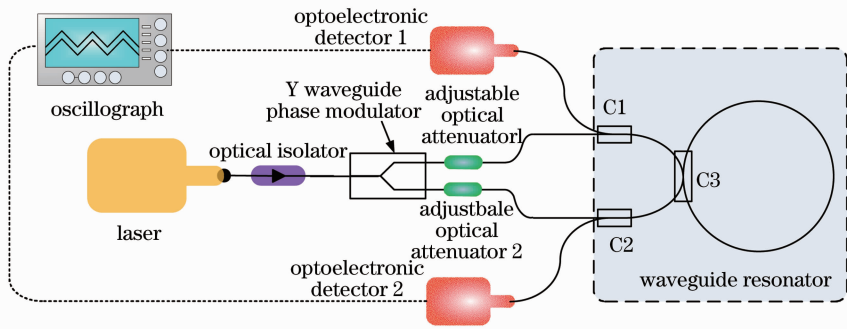


图 7 分光比强度补偿实验原理图

Fig. 7 Experimental setup of splitting ratio compensation

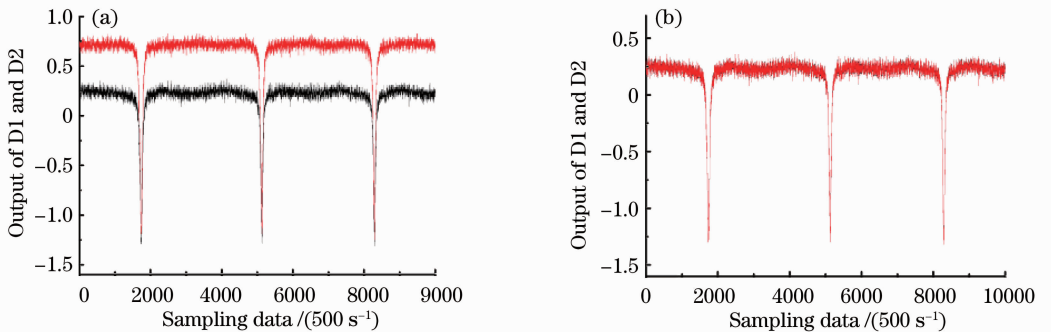


图 8 系统双路光强调整匹配实验结果。(a)未调节补偿时的输出；(b)调节补偿后输出

Fig. 8 Experimental result of splitting ratio compensation. (a) Output without adjustment of attenuator; (b) output with adjustment of attenuator

图 8(a)为未调节补偿时的探测器的输出, CW 和 CCW 光路的输出谐振曲线峰值之间存在 490 mV 的偏差, 计算得到此时两路的光强差为  $12.9 \mu\text{W}$ 。该电压差是 3.3 节中 4 个影响因素引起的, 其中集成光调制器两臂的分光比 0.01 的误差引起了部分光强失配, 其他部分主要由光纤熔接点损耗不对称引起的。图 8(b)为经过可变衰减器调节后的两探测器输出, 通过调节可变衰减器可实现两光路的严格对称, 因而从理论上消除克尔噪声的影响。

实际测试中, 为了减少系统的复杂度, 一般在可变衰减器调节完毕后, 记录下其衰减器, 通过光纤熔点的衰减熔接实现两光路光功率的严格匹配。受限于实验条件的限制, 目前还没有完成对陀螺样机的电路克尔噪声抑制方案进行测试, 该实验正在准备过程中, 实验结果会在后续报道, 本文主要侧重于光路抑制克尔噪声方案。

## 6 结 论

给出了 IORG 中克尔噪声的产生机理, 分析了谐振腔结构 IORG 样机中产生克尔噪声的主要因素, 并对各个因素产生的误差进行了分析, 分别给出了其抑制方法。建立了 IORG 的克尔噪声理论模

型, 分析得到了 IORG 中克尔噪声引起的陀螺输出的数学表达式, 软件仿真了输入光源谱线宽度、波导单位损耗和顺时针光功率差对陀螺输出精度的影响, 得到了如下结论: 对中等精度的 IORG, 其克尔噪声引起的输出偏差  $\Omega_k$  与输入光源的谱宽成反比, 因此单纯对  $\Omega_k$  而言, 其输入光源的线宽越大越好, 但是谐振式陀螺的原理决定了其光源必须采用窄线宽光源, 根据仿真结果综合考虑输入光源的谱宽应小于 1 MHz; 在谐振腔长度一定的条件下, 波导损耗与克尔噪声引起的输出偏差  $\Omega$  成反比, 但低损耗能够大大的提升谐振腔的谐振清晰度<sup>[18]</sup>, 故应折中考虑材料的损耗特性; 仿真分析了引入克尔噪声的主要因素顺、逆时针光强差对克尔噪声输出  $\Omega_k$  的影响。最后得到了对于低精度的 IORG 其极限灵敏度小于克尔噪声引起的偏差  $\Omega_k$  可通过现有的工艺水平来解决; 而对于中、高精度的 IORG, 克尔噪声不可忽略, 需要采用光路补偿措施进行抑制, 并进行了初步实验, 验证了理论推导的正确性。

## 参 考 文 献

- Xue Wensheng. Review of development of some new types of gyros[J]. *J. UEST of China*, 1995, 24(5): 485~489
- 薛文胜. 浅析几种新型陀螺的发展动态 [J]. 电子科技大学学

- 报, 1995, **24**(5): 485~450
- 2 N. Barbour. Inertial components-past, present and future [C]. Montreal; Invited Paper AIAA Guidance, Navigation and Control Conference, 2001
- 3 Yu Huaiyong, Zhang Chunxi, Feng Lishuang *et al.*. Analysis of Rayleigh backscatter noise in micro-optical resonance gyroscope [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(3): 799~803  
于怀勇, 张春熹, 冯丽爽等. 硅基微光学谐振式陀螺瑞利背向散射噪声分析 [J]. *光学学报*, 2009, **29**(3): 799~803
- 4 Feng Xiang, Ma Yingjian, Yu Huaiyong *et al.*. Investigation on the modulation of the optimized sensitivity for the resonator optic gyroscope[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(4): 1064~1067  
冯翔, 马迎建, 于怀勇等. 谐振式微光学陀螺最佳灵敏度调节的研究 [J]. *中国激光*, 2010, **37**(4): 1064~1067
- 5 Ma Huilian, Jin Zhonghe, Ding Chun *et al.*. Optimal design of ring resonator in silica optical waveguide[J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(10): 1330~1332  
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 Peng Bo, Yang Zhihui, Ma Huilian *et al.*. Digitalization of the detection circuit for resonator fiber optic gyro based on the phase modulation spectroscopy technique[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(6): 1479~1483  
彭博, 杨志怀, 马慧莲等. 基于调相谱技术的谐振式光纤陀螺检测电路数字化研究 [J]. *中国激光*, 2009, **36**(6): 1479~1483
- 7 Xiao Guixia, Ding Jinxing. The research of a passive resonator gyroscope system[J]. *Laser Technology*, 1998, **22**(2): 72~76  
肖贵遐, 丁金星. 无源谐振腔激光陀螺实验系统的研制 [J]. *激光技术*, 1998, **22**(2): 72~76
- 8 X. Wang, Z. He, H. Kazou. Automated suppression of polarization-fluctuation in resonator fiber optic gyro by a resonator with twin 90° polarization-axis rotated splices-theoretical analysis [C]. *SPIE*, 2010, **7653**: 76533H
- 9 K. Suzuki, K. Takiguchi, K. Hotate. Monolithically integrated resonator microoptic gyro on silica planar lightwave circuit [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2000, **18**(1): 66~72
- 10 Ma Huilian, Jin Zhonghe, Ding Chun *et al.*. Influence of spectral linewidth of laser on resonance characteristics in fiber ring resonator[J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(8): 731~734  
马慧莲, 金仲和, 丁纯等. 激光器线宽对光纤环形谐振腔谐振特性的影响 [J]. *中国激光*, 2003, **30**(8): 731~734
- 11 S. Huang, L. Thevenaz, K. Toyama *et al.*. Optical Kerr-effect in fiber-optic Brillouin ring laser gyroscopes [J]. *Photon. Technol. Lett.*, 1993, **5**(3): 365~367
- 12 Hervé. C. Lefèvre. The Fiber-Optic Gyroscope [M]. Zhang Guicai, Wang Wei Transl.. Beijing: National Defense Industry Press, 2002  
Hervé. C. Lefèvre. 光纤陀螺仪 [M]. 张桂才, 王巍译. 北京: 国防工业出版社, 2002
- 13 H. Yu, C. Zhang, L. Feng *et al.*. SiO<sub>2</sub> Waveguide resonator used in an integrated optical gyroscope [J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2009, **26**(5): 054210
- 14 A. E. Kaplan, P. Meystre. Enhancement of the Sagnac effect due to nonlinearly induced nonreciprocity [J]. *Opt. Lett.*, 1981, **6**(12): 590~592
- 15 R. A. Bergh, H. C. Lefevre, H. J. Shaw. Compensation of the optical Kerr effect in fiber-optic gyroscopes [J]. *Opt. Lett.*, 1982, **7**(6): 282~284
- 16 K. Takiguchi, K. Hotate. Method to reduce the optical Kerr-effect-induced bias in an optical passive ring-resonator gyro [J]. *Photon. Technol. Lett.*, 1992, **4**(2): 203~206
- 17 K. Iwatsuki, K. Hotate, M. Higashiguchi. Kerr effect in an optical passive ring-resonator gyro [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1986, **4**(6): 645~651
- 18 Feng Lishuang, Yu Huaiyong, Hong Lingfei. Optimal design of integrated optic waveguide resonator for IORG [J]. *Optical Technique*, 2008, **34**(1): 149~151  
冯丽爽, 于怀勇, 洪灵菲. 用于集成光学陀螺的波导谐振腔设计 [J]. *光学技术*, 2008, **34**(1): 149~151