

# 硅基微光学谐振式陀螺瑞利背向散射噪声分析

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> 邢济武<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 北京航空航天大学光电技术研究所, 北京 100191; <sup>2</sup> 精密光机电一体化教育部重点实验室, 北京 100191)

**摘要** 阐述了硅基微光学陀螺(MORG)结构中瑞利背向散射噪声的产生机理,并创建了硅基微光学陀螺光路的静态与动态理论模型,公式化地描述了硅基二氧化硅谐振腔中的该噪声特性,并通过软件算法仿真综合分析了硅基微光学谐振式陀螺中瑞利背向散射噪声与主信号强度之间的关系,以及其与反向光信号的干涉信号对主信号的影响。分析了瑞利背向散射噪声信号对谐振腔性能的影响,定量分析了此噪声对谐振腔清晰度、陀螺极限灵敏度的影响。提出了抑制系统中该噪声的方案,并搭建实验装置,利用提出的解决方案对系统进行了优化,实验验证了理论分析的结果。

**关键词** 集成光学; 硅基微光学陀螺; 噪声分析; 谐振腔; 瑞利背向散射

**中图分类号** V241.5<sup>+</sup>9 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092903.0799

## Analysis of Rayleigh Backscattering Noise in Micro-Optical Resonance Gyroscope

Yu Huaiyong<sup>1</sup> Zhang Chunxi<sup>1,2</sup> Feng Lishuang<sup>1,2</sup> Hong Lingfei<sup>1</sup> Xing Jiwu<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institute of Opto-Electronics Technology, Beihang University, Beijing 100191, China

<sup>2</sup>Key Laboratory for Precision Opto-Mechatronics Technology, Ministry of Education, Beijing 100191, China

**Abstract** The theory of Rayleigh backscattering noise in the silicon substrate micro-optical resonance gyro (MORG) is described, and the static-and dynamic-state models of MORG are constructed. Characteristics of this noise in the resonator of SiO<sub>2</sub> on Si substrate are formulized. The relationship between the Rayleigh backscattering noise and main signal intensity, and the effect on the main signal by the interference signal of the noise and reverse optical signal, are simulated by software algorithm. Effect of this noise on the performance of the resonator, such as the definition and the maximal sensitivity, is analyzed. The scheme to suppress the noise is proposed. Based on the analysis, the experimental system is set up. The results agree well with theoretic calculation.

**Key words** integrated optics; silicon-substrate micro-optical resonance gyroscope (MORG); noise analysis; resonator; Rayleigh backscattering noise

## 1 引 言

硅基微光学谐振式陀螺是采用硅基二氧化硅波导作为谐振腔,其原理基于 Sagnac 效应<sup>[1]</sup>,通过探测谐振腔中顺时针与逆时针传播的光的谐振频率差值来检测外界角速度的惯性器件。其体积小、质量轻、成本低、可批量生产等优势使得其中低精度的惯性领域,比如汽车导航、工业自动化控制等制领域,有着广阔的应用前景,是目前研究的热点之一。

但是,由于光在介质中传播,光的传播过程会受到一些噪声的影响,主要有硅基波导的瑞利背向散射噪声(Rayleigh backscattering noise)<sup>[2]</sup>、偏振噪声(Polarization noise)<sup>[3,4]</sup>、克尔噪声(Kerr-effect noise)<sup>[5~7]</sup>等。这些噪声的影响使得陀螺的极限灵敏度降低,系统的性能大大的下降,不能满足当前应用的需求。本文对硅基微光学谐振式陀螺进行了瑞利背向散射噪声的理论分析,及相应的实验验证。

收稿日期: 2008-06-17; 收到修改稿日期: 2008-08-27

作者简介: 于怀勇(1982-),男,博士研究生,主要研究方向为集成光学与微型陀螺技术。

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

导师简介: 张春熹(1965-),男,教授、博士生导师,主要研究领域为光学惯性器件。E-mail: zchunxi@hotmail.com

## 2 硅基微光学谐振式陀螺的原理

硅基微光学陀螺主要由硅基二氧化硅谐振腔,窄线宽激光器,集成光学调制器,信号检测电路等几部分组成,其系统的示意图如图 1 所示,光源发出的光,经过集成光学调制器进行起偏、分束后进入硅基二氧化硅波导谐振腔,通过陀螺检测电路实时检测顺时针与逆时针光在外界转动时由于 Sagnac 效应产生的频率差,实现对外界角速度的测量。

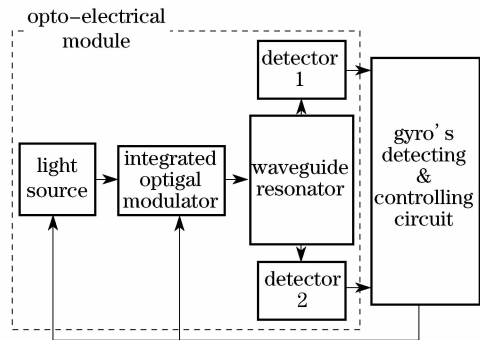


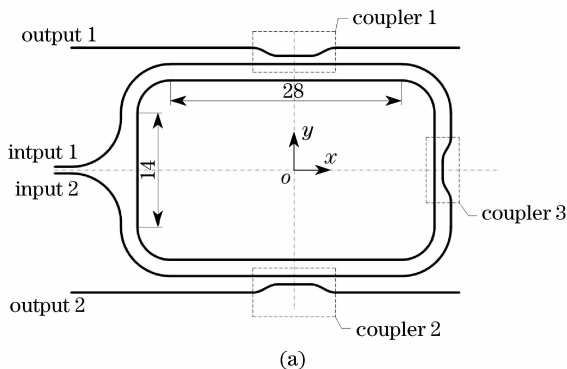
图 1 硅基微光学陀螺系统示意图

Fig. 1 Schematic of silicon substrate micro-optical resonance gyro

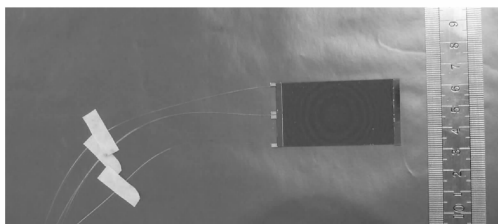
## 3 瑞利背向散射噪声的产生机理

### 3.1 硅基二氧化硅谐振腔的结构

硅基二氧化硅谐振腔的结构示意图<sup>[8,9]</sup>如图 2(a)



(a)



(b)

图 2 (a) 硅基二氧化硅波导结构示意图

(b) 硅基二氧化硅波导实物图

Fig. 2 (a) Sketch map of SiO<sub>2</sub> on Si waveguide

(b) Photo of SiO<sub>2</sub> on Si waveguide

所示,其形状为对称型类跑道形结构,整个芯片表面尺寸为 30 mm×40 mm,高度为 450 μm 左右。此结构包含两个腔外耦合器 C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub> 与一个腔内耦合器 C<sub>3</sub>,其耦合分光比分别为 50% : 50%, 50% : 50%, 95% : 5%。其加工工艺是 PECVD 工艺。经微加工工艺加工制作后的实物图如图 2(b)所示,由于加工工艺上的缺陷,必然会在硅基二氧化硅波导的内部产生瑕疵,因此会引起输入光的瑞利背向散射噪声<sup>[10,11]</sup>。

### 3.2 瑞利背向散射噪声机理

瑞利背向散射是由入射光激发传输媒质中的原子键的偶极子天线辐射引起的,它与入射光波长的四次方成反比例关系。在随机结构的物体中,瑞利背向散射会存在累积效应。在硅基二氧化硅波导谐振腔中,其物质结构形式排列不规则为非晶态类结构,故其受瑞利背散效应影响很大<sup>[12]</sup>。需要注意的是,沿向前瑞利散射光或向后的部分散射光均能处于导波状态,需要注意的是前向传播的部分散射光是互易的,不会产生任何寄生效应,而后向的散射是随机分布的背向散射,会造成一定的负面影响。

硅基二氧化硅陀螺中的瑞利背向散射噪声的产生机理如上图 3 所示,顺时针传输的信号光会与逆时针传输光的背散光产生干涉,从而影响探测器的探测光强值。故在硅基二氧化硅波导谐振腔的输出信号主要有三部分组成:信号光强 I<sub>s</sub>、反方向光的背散光信号 I<sub>b</sub>、信号光与反方向光背散光的干涉光强 I<sub>i</sub>。对这三部分进行数学建模分析是本文的重点。一般情况下,波导中的瑞利背散噪声强度为

$$I_b = I_m(1 - 10^{-\alpha_R L_c / 10})S, \quad (1)$$

其中 I<sub>m</sub> 为主波强度;α<sub>R</sub> 为瑞利散射的衰减因子;L<sub>c</sub> 为光源的相干长度;S 为恢复因子,它近似等于光纤的立体接收角(约为 NA<sup>2</sup> 与 4π 球面度的全立体角之比。)

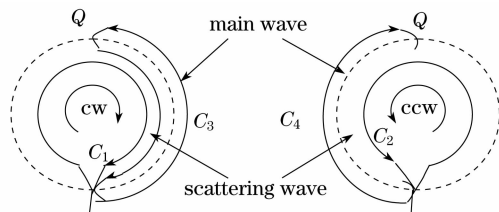


图 3 腔中瑞利背向散射的产生机理示意图

Fig. 3 Sketch map of Rayleigh backscattering noise in the silicon substrate (MORG)

在光纤谐振腔中,取工作波长为 λ = 1550 nm, α<sub>R</sub> = 0.0002 dB/m, L<sub>c</sub> = 20 μm, S = 10<sup>-3</sup>, 此时的瑞利背向散射光的强度与信号光的强度比为

$$I_{cb}/I_m = (1 - 10^{-\alpha_R L_c/10})S \approx 9.2103 \times 10^{-12}.$$

对于波导谐振腔:取工作波长为  $\lambda = 1550 \text{ nm}$ ,  $\alpha_R = 1 \text{ dB/m}$ ,  $L_c = 1 \times 10^4 \text{ m}$ ,  $S = 0.0025$ , 此时瑞利背向散射光与主信号强度之比为

$$I_{cb}/I_m = (1 - 10^{-\alpha_R L_c/10})S \approx 2.5 \times 10^{-3}.$$

对比光纤谐振腔而言,波导式谐振腔由于衰减因子和恢复因子的增大,使得其瑞利背散噪声信号在信号中的比重增大了几个数量级,所以说对其瑞利背散噪声的建模分析是十分必要的。

## 4 噪声数学建模及仿真分析

前面已分析了在硅基二氧化硅波导谐振式陀螺中存在瑞利背向散射噪声,且噪声的存在较光纤陀螺相比大为增加,降低了谐振腔的清晰度、谐振深度,对系统极限灵敏度也产生了负面影响。为了更清晰的量化瑞利背散噪声对系统的影响,分为两个方面来考虑问题:一是理想情况下,即不存在瑞利背向散射噪声时,输出光强信号的数学表示。二是在考虑瑞利背散噪声的情况下,探测器处光强信号的数学表示。

### 4.1 理想情况下,探测器处光强的数学表示

在不考虑噪声影响的条件下,仅仅考虑光路与谐振腔的传播函数,将激光器的谱线宽度、谐振腔的谐振深度、耦合器直通端的光场耦合系数、光在谐振腔中渡越时间、耦合器损耗、波导损耗、谐振腔的长度、功率传输效率、光源出射光与耦合进波导之间的传输效率、谐振腔的输入光强分别用  $\Delta f$ ,  $\rho$ ,  $r'$ ,  $\tau$ 、

$$I_i = 2 \sqrt{\alpha_R SL} (C_r + C_i)^{1/2} T I_0 \cos(\xi_R + \xi_0),$$

$$C_r + jC_i = \frac{-r'(1-r'R')^2 + Tt_f R' \{(1-r'R') + [1 - R_f \exp(j\omega\tau_0)]\}}{(1-r'R')^2 [1 - R_f \exp(j\omega\tau_0)]^2} + \frac{Tt_f \exp(-2\pi\Delta f\tau_0) \exp(-j\omega\tau_0)}{(1-r'R')^2 [1 - r' \exp(-2\pi\Delta f\tau_0) \exp(-j\omega\tau_0)]^2},$$

$$I_b = \alpha_R SL \left\{ \left[ \frac{\rho}{1-t_f^2} L(\psi) \right]^2 + \frac{2T(R'^2 - R_f^2)}{(1-R'^2)(1-R_f^2)} \frac{\rho}{1-t_f^2} L(\psi) \right\} I_0,$$

$\xi_R$ 、 $\xi_0$  分别为余弦函数相位常数、热浮动相位差。此时通过软件仿真计算得到主要信号  $I_s$ , 瑞利背散信号  $I_b$ , 两者干扰信号  $I_i$  如图 4, 图 5 所示。

图 5 显示了考虑背散光以后谐振腔的输出光强与不考虑背散光时谐振腔的输出光强。可以看出,系统如果引入瑞利背向散射噪声,则其谐振深度会减小,约从 0.76 降低到 0.65 左右。此时经计算,不考虑背散光时谐振腔的精细度为  $F = 39.4255$ , 此时集成光学陀螺的理论极限灵敏度为  $0.7109^\circ/\text{h}$ 。由

$\alpha_c$ 、 $\alpha_r$ 、 $L$ 、 $T$ 、 $t_f$ 、 $I_0$  表示。可以得到如图 1 中探测器 D1 或 D2 的归一化光强表示为,采用洛伦兹光谱线型可以表示为

$$I_s(\psi) = [1 - \rho L(\psi)] I_0, \quad (2)$$

其中

$$L(\psi) = \frac{(1 - R_f)^2}{(1 - R_f)^2 + 4R_f \sin^2(\psi/2)},$$

$$\psi = \omega\tau_0,$$

$$\rho = \frac{(1-R)(1-R_f^2)[(1-t_f^2) + [1 - \exp(-\alpha_c)]t_f^2(1-R)]}{(1-R_f^2)(1-R'^2)},$$

$$R' = r't_f,$$

$$R_f = R' \exp(-2\pi\Delta f\tau_0),$$

$$T = (1 - r'^2) \exp(-\alpha_c),$$

$$t_f = \exp[-(\alpha'_c + \alpha_r L)/2].$$

### 4.2 考虑瑞利背向散射噪声后,探测器光强的数学表示

由于硅基波导的加工缺陷与材料属性,其内部必然存在瑞利背散噪声,在系统静态、动态条件下,分别建立起噪声信号等效模型如下:

#### 4.2.1 静态系统的建模分析

当陀螺处于静止的时候,不考虑外界的影响,仅考虑硅基二氧化硅内部的瑞利背向散射,即由波导内部折射率的变化引起的折射率双极子的运动产生的。此时探测器接收到的光强会发生变化,可以表示为如下的形式:

$$I_{sjt} = I_s + I_i + I_b, \quad (3)$$

其中

于谐振腔的本征谱线宽度等于光强变为最大光强值一半时的谱宽,可以计算得到考虑背散光后的谐振腔的本征谱线宽度为  $\Delta f_{\text{FWHM}} = 66.1 \text{ MHz}$ , 由谐振腔自由光谱范围  $R_{fs} = 1.6098 \text{ GHz}$ , 谐振腔的精细度为:  $F = R_{fs}/\Delta f_{\text{FWHM}} = 24.35$ 。谐振腔精细度的下降导致探测器极限灵敏度的下降,此时集成光学陀螺的理论极限灵敏度为  $1.15^\circ/\text{h}$ 。由此可见,瑞利背散光强对陀螺的关键因素极限灵敏度影响很大,必须采取一定的措施加以控制和消除。

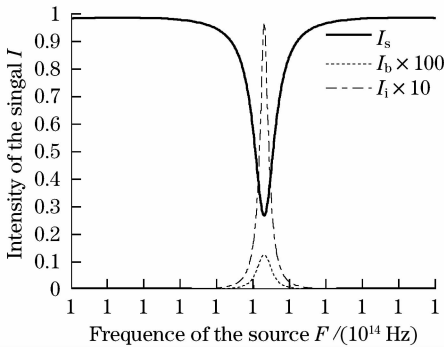


图 4  $I_s, I_b, I_i$  的频率与其幅值的关系图

Fig. 4 Relationship of frequency and amplitude of  $I_s, I_b, I_i$

4.2.2 动态系统的建模分析

当外界存在角速度时,即陀螺处于工作状态时,此时由于 Sagnac 效应的影响,瑞利背向散射光信号会产生两个峰,其峰之间的间距为两倍的 Sagnac 相

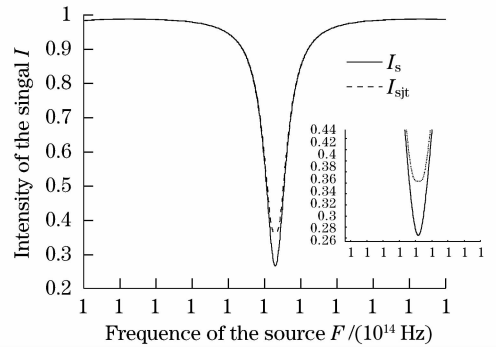


图 5 瑞利背散噪声影响( $I_{sjt}$ )与理想情况( $I_s$ )的关系曲线

Fig. 5 Relationship of  $I_{sjt}$  and  $I_s$

移。采用  $\theta, \psi_1, \psi_2$  分别表示由 Sagnac 引起的相移、顺时针光的相移,逆时针的相移。此时系统示意图中探测器  $D_1, D_2$  的光强分别表示为

$$I_{b1} = \alpha_R SL_f(2\theta) \left\{ \begin{aligned} & \left( \frac{\rho}{1-t_f^2} \right)^2 \frac{(1-2R_f \cos \theta + R_f^2)(1+2R_f \cos \theta + R_f^2)}{(1-R_f^2)^2} \dots \\ & \dots * L(\psi_1)L(\psi_1 - 2\theta) + \frac{T(R'^2 - R_f^2)}{(1-R_f^2)^2(1-R'^2)} \frac{\rho}{1-t_f^2} [L(\psi_1) + L(\psi_1 - 2\theta)] \end{aligned} \right\} I_0, \quad (4-1)$$

$$I_{b2} = \alpha_R SL_f(2\theta) \left\{ \begin{aligned} & \left( \frac{\rho}{1-t_f^2} \right)^2 \frac{(1-2R_f \cos \theta + R_f^2)(1+2R_f \cos \theta + R_f^2)}{(1-R_f^2)^2} \dots \\ & \dots * L(\psi_2)L(\psi_2 + 2\theta) + \frac{T(R'^2 - R_f^2)}{(1-R_f^2)^2(1-R'^2)} \frac{\rho}{1-t_f^2} [L(\psi_2) + L(\psi_2 - 2\theta)] \end{aligned} \right\} I_0, \quad (4-2)$$

上式中

$$\psi_1 = \omega \tau_0 + \theta,$$

$$\psi_2 = \omega \tau_0 - \theta,$$

$$f(x) = (1-R'^2)^2 / [(1-R'^2)^2 + 4R'^2 \sin^2(x/2)].$$

此时通过软件进行仿真,可得到如下结果:仿真参数为 Sagnac 相移为 0.0075 rad(0.43)时,其仿真的结果如图 6 所示。

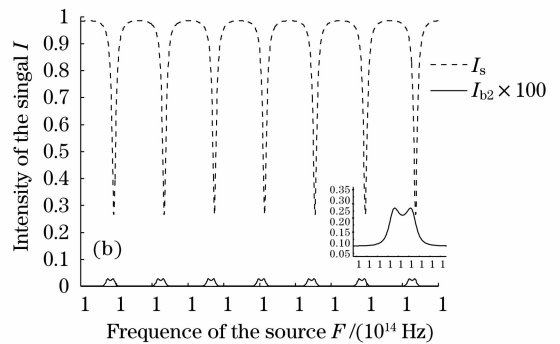
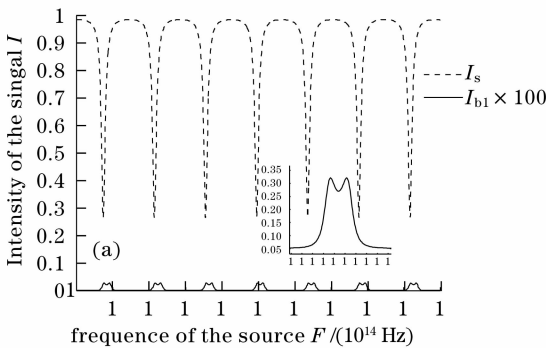


图 6 (a)顺时针转动时瑞利噪声  $I_{b1}$  (b)逆时针转动时瑞利噪声  $I_{b2}$

Fig. 6 (a) Rayleigh backscattering noise in CW direction (b) Rayleigh backscattering noise in CCW direction

5 抑制 MORG 中瑞利背散噪声措施

由于瑞利背散噪声极大地影响了陀螺的极限灵敏度,减小了陀螺系统输出的线性度,所以对 MORG 中的瑞利背散噪声进行抑制是非常必要的。

目前抑制瑞利背向散射噪声<sup>[13]</sup>的主要方法有两种:一是 BSK(二位相移键控)来降低信号光与背散光的干涉项的影响;二是通过对谐振腔中的两路光进行不同频率的调制,使得信号光与背反光不发生干

涉来消除瑞利背散噪声。第三种是在光信号输入到谐振腔之前,对某一光进行相位延时,主要手段是光进入谐振腔之前添加 Meach-Zehnder 开关或某光

路经过足够长的光纤。

本文采用第二种方案即在集成光学调制器的两臂施加不同频率的调制信号,其实验装置如图 7 所示。

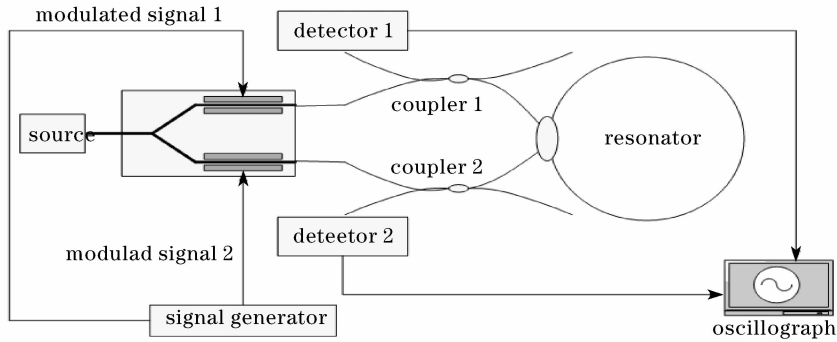


图 7 实验装置示意图

Fig. 7 Sketch map of experimental setup

实验中采用自行设计的信号检测电路板或者是信号发生器(型号)输出两路调制信号,施加到集成光学调制器的两臂,从而对信号产生移频,其调制理论公式为

$$I_s(\psi) = [1 - \rho L(\psi - A_m \cos \omega_m t)] I_0, \quad (5)$$

其中  $A_m$  为调制波的幅值,  $\cos \omega_m t$  为调制波调制的傅里叶分解。

不加波形调制时,硅基谐振腔的输出两路为静态谐振曲线,其谐振频率相等,故其谐振频率差为零,实验结果如图 8(a)所示。

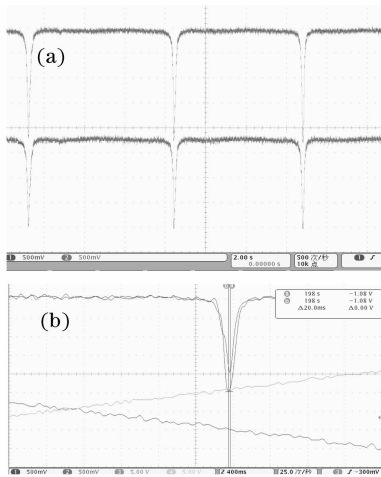


图 8 实验测量结果(a)未施加调制时的探测器输出  
(b)施加调制时的探测器输出

ig. 8 Experimental result. (a) Output of detector without modulation (b) Output of detector with modulation

在集成光学调制器的两臂施加锯齿波调制时,由于集成光学调制器的半波电压为 5.84 V,施加信号的频率为 1 MHz,峰-峰值为 20 V,则经计算可知两光路应产生频移为约 6.89 MHz 的频率偏移,经实验测量,如图 8(b)所示,经计算知其两路偏移等

效频率为 7.1 MHz,可以看出实验与理论分析在误差允许范围内吻合。同时,实测的两路谐振深度的变化分别为:一路从 0.5590 降到了 0.5487,另一路从 0.5114 降到了 0.5029。此部分与仿真结果有一定的偏差,这主要是由仿真过程中相关参数的选取偏差引起的。以上结果说明可以通过施加不同频率的调制来减弱瑞利背向散射的影响。

## 6 结 论

本文首先给出了硅基微光学谐振式陀螺的谐振腔的结构,针对其结构和材料特性分析了瑞利背向散射噪声,并给出了硅基二氧化硅谐振腔中瑞利背向散射的噪声模型的数学表达形式,同时利用数学模型进行了系统的仿真运算,给出了硅基二氧化硅谐振腔中瑞利背向散射噪声与主信号的光噪声,并分析了瑞利背向散射对谐振腔的谐振清晰度和系统极限灵敏度的影响。最后,针对瑞利背散的噪声特性,给出了实验方案,并实验验证了锯齿波调制信号对硅基微光学陀螺的瑞利背向散射噪声的抑制。

## 参 考 文 献

- Hervé C. Lefèvre. *The Fiber-Optic Gyroscope* [M]. Zhang Guicai, Wang Wei transl. Beijing: National Defence Industry Press, 2002: 4~9  
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: 4~9
- K. Iwatsuki, K. Hotate, M. Higashiguchi. Effect of Rayleigh backscattering in an optical ring-resonator gyro[J]. *Appl. Opt.*, 1984, **23**(21): 3916~3924
- Mi Jian, Zhang Chunxi, Li Zheng *et al.*. Effect of polarization interference on fiber optic gyro performance[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **8**: 1140~1144  
米 剑,张春熹,李 铮 等. 偏光干涉对光纤陀螺性能的影响[J]. 光学学报, 2006, **8**: 1140~1144

- 4 Katsumi Iwatsuki, Kazuo Hotate, Minoru Higashiguchi. Eigenstate of polarization in a fiber ring resonator and its effect in an optical passive ring-resonator gyro[J]. *Appl. Opt.*, 1986, **25**(15):2606~2612
- 5 R. A. Berggh, H. C. Lefevre, H. J. Shaw. Compensation of the optical Kerr effect in fiber-optic gyroscopes[J]. *Opt. Lett.*, 1982, **7**(6):282~284
- 6 Zhang Xulin, Ma Huilian, Ding Chun *et al.*. Optical kerr effect in phase modulation spectroscopy resonator feber optic gyro[J]. *Chin. J. Lasers*, 2006, **33**(6): 814~818  
张旭琳, 马慧莲, 丁 纯 等. 谐振式光纤陀螺调相谱检测技术中的克尔效应[J]. *中国激光*, 2006, **33**(6): 814~818
- 7 Yu Xiujuan, Liao Yanbiao, Zhang Min *et al.*. Kerr effect in an optical passive ring-resonator gyro using a hollow-core photonic band-gap fiber[J]. *Chin. J. Lasers*, 2008, **35**(3):430~435  
于秀娟, 廖延彪, 张 敏 等. 谐振式空心光子带隙光纤陀螺中的光克尔效应[J]. *中国激光*, 2008, **35**(3):430~435
- 8 Feng Lishuang, Yu Huaiyong, Hong Lingfei. Optimal design of integrated optic waveguide resonator for IORG [J]. *Optical Technique*, 2008, **34**(189):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**(189):149~151
- 9 Feng Lishuang, Yu Huaiyong, Hong Lingfei *et al.*. Optimal design of optical waveguide resonator for MOG[J]. *Chin. J. Sensors and Actuators*, 2008, **21**(3):504~508  
冯丽爽, 于怀勇, 洪灵菲 等. 微光学陀螺波导谐振腔的优化设计[J]. *传感技术学报*, 2008, **21**(3):504~508
- 10 Kenya Suzuki, Koichi Takiguchi, Kazuo Hotate. Monolithically integrated resonator mrocrooptic gyro on silica planar lightwave circuit[J]. *IEEE J. Lightwave Technology*, 2000, **18**(1): 66~72
- 11 M. J. Marrone, A. D. Kersey, C. A. Villarruel *et al.*. Dandridge. Elimination of Coherent Rayleigh Backscatter Induced Noise in Fiber Michelson Interferometers [J]. *Electron. Lett.*, 1992, **28**(19):1803~1804
- 12 E. Wong, X. Zhao, C. J. Chang-Hasnain, W. Hofmann *et al.*. Rayleigh backscattering and extinction ratio study of optically injection-locked 1.55  $\mu\text{m}$  VCSELs[J]. *Electron. Lett.*, 2007, **43**(3):182~183
- 13 Kazuo Hotate, Koichi Takiguchi. Adjustment-Free Method to Eliminate the Noise Induced by the Backscattering in an Optical Passive Ring-Resonator Gyro [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1990, **2**(1):75~78