光电器件

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.20241225001

集成光纤陀螺的偏振误差分析与抑制方法

张智子，王梓丞*，匡崇葳，朱昌胜，张相军
（哈尔滨工业大学 仪器科学与工程学院，哈尔滨 150001）

摘　要： 集成式干涉光纤陀螺（Integrated Interferometric Fiber Optic Gyroscope，I-IFOG）凭借微型化、低功耗的特点，成为新一代干涉式光纤陀螺的技术方案。由于光学器件在芯片化集成后不再以保偏光纤连接，无法保持偏振态稳定，陀螺的角速度测量精度和稳定性大大降低。偏振误差问题将进一步制约I-IFOG的实际使用。文章根据I-IFOG的光路结构，采用琼斯矩阵建立了集成光学芯片的偏振度与陀螺相位误差的数学模型。通过数学模型分析可知，影响偏振误差的主要原因为集成光路中偏振串扰、模式色散等引起的非互易性相移误差。因此，在集成光路中设计了一种新型波导起偏器，用于滤除不需要的偏振光，使信号光保持高偏振度。利用偏振分析仪对信号光偏振态测试，所提出的起偏器结构与传统偏振器相比，偏振度提高了7.16%，偏振消光比提高了39.8%。最后，搭建了基于所提出的偏振误差抑制方法的集成光纤陀螺试验样机，并进行了整机静态性能测试。集成光纤陀螺样机实现了地球转速的测量，测量精度为0.112 9（°）/h。

关键词： 光纤陀螺；集成光学；硅基光波导；偏振误差
中图分类号： TN305.8　**文章编号：** 1001－5868(2025)02－0275－09

Polarization Error Analysis and Suppression Method of Integrated Fiber Optic Gyroscope

ZHANG Zhizi, WANG Zicheng, KUANG Chongwei, ZHU Changsheng, ZHANG Xiangjun
(**School of Instrumentation Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, CHN**)

Abstract: An integrated interferometric fiber optic gyroscope (I-IFOG) is a promising solution for next-generation interferometric fiber optic gyroscopes (IFOG) owing to its miniaturization and low power consumption. After integrating the optical components onto a chip, a significant polarization error arises because of the absence of polarization-maintaining fiber connections, which significantly reduces the angular velocity measurement accuracy and gyroscope stability. The polarization error greatly restricts further use of the I-IFOG. To analyze the optical path polarization, a polarization error model of the integrated optical chip was established based on a Jones matrix. Using the mathematical model, we have found that the primary factors affecting polarization are the nonreciprocity noise induced by polarization crosstalk and mode dispersion. Therefore, a novel waveguide polarizer is proposed to remove the undesired polarized light and maintain a high degree of polarization. To verify the polarizer performance, the polarization state of the signal was measured using a polarization analyzer. The degree of polarization improved by 7.16% and the extinction ratio improved by 39.8% compared with those of a traditional polarizer. Finally, a prototype based on the referred polarization suppression method was generated to measure the Earth's speed, and the static performance was checked and processed. The accuracy of the prototype reached 0.112 9 (°)/h.

Key words: fiber optic gyroscope; integrated optics; silicon-based optical waveguide; polarization error

收稿日期：2024－12－25.
*通信作者：王梓丞

0 引言

干涉式光纤陀螺(Interferometric Fiber Optic Gyroscope, IFOG)作为一种角速度传感器,广泛应用于航空航天、海洋导航、能源、武器系统及医疗等诸多领域[1-4]。IFOG主要由分立光路、光纤敏感环、信号处理电路三部分组成。分立光路部分包括光源、光电探测器、耦合器和相位调制器等元件,这些分立的光学器件以及敏感环的尺寸限制了光纤陀螺的总体大小[5-7]。随着对光纤陀螺小型化需求的增加,许多研究机构开始探索IFOG的集成设计。其目标是将分立的光学器件与光纤敏感环部分或全部集成到光学芯片中,以大幅减小设备的体积和生产成本。硅光子技术通过微电子和光电子技术的高度融合,在硅基衬底上实现有源器件与无源器件的功能集成。因此,采用硅光芯片代替分立光学器件成为光纤陀螺集成化的主要解决方案[8-16]。

2019年,KVH公司研发了一种光子集成电路(Photonic Integrated Circuit, PIC)芯片,并基于该芯片设计了一种高可靠性、低成本的新型光纤陀螺[17]。PIC芯片集成了低损耗耦合器、起偏器及模式转换器等关键元件。芯片以Si_3N_4作为芯层、SiO_2作为包层材料,设计了高保偏波导。高保偏波导和起偏器的设计有效减小了极化交叉耦合引起的误差,可以满足战术级陀螺应用。

2020~2021年,北京自动化控制设备研究所的研究团队[18-19]先后提出"三合一"与"四合一"光纤陀螺芯片方案。"三合一"芯片集成了光源探测器、3 dB耦合器以及Y波导。另外,在"三合一"集成光学芯片与相位调制器之间设置了高阶模式滤波器,可以有效抑制模式串扰现象。"四合一"集成方案在"三合一"方案的基础上,将原本独立的相位调制器也集成在同一芯片上,大大提高器件的集成度。实验结果表明集成化光纤陀螺相较于同尺寸的光纤陀螺具有显著的精度优势,相较于同等精度的传统光纤陀螺也具有显著的尺寸优势。

近年来,国内外对干涉式集成光学陀螺进行了许多研究。尤其是集成光学芯片,信号光的传输质量直接影响测量精度。因此需要通过设计低损耗传输和模式起偏结构来减少噪声并提高信号光传输质量。为了进一步探讨偏振误差分析对集成光纤陀螺偏振性能的影响以及如何根据偏振误差分析设计陀螺偏振光路,本文针对I-IFOG中光路的偏振误差抑制开展研究。首先,构建I-IFOG光路系统的偏振串扰误差模型,基于琼斯矩阵搭建离散光路器件的物理模型和光路系统的完整传输模型,并建立了IFOG的相位误差模型。通过仿真分析了光路非理想因素对于I-IFOG偏振误差的影响。其次,提出一种新型硅基耦合器型波导起偏器,滤除顺逆时针光路中的寄生偏振态,抑制了集成光纤陀螺系统偏振误差的产生。最后搭建了陀螺试验样机,实现对地球转速的测量。

1 偏振误差理论分析

1.1 集成器件的琼斯矩阵

I-IFOG由超辐射发光二极管(Super Luminescent Diode, SLD)光源、耦合器、相位调制器、微型光纤环和波导型探测器五个部分组成,其光路结构如图1所示。a点为微型保偏光纤环圈中受弯曲、张力等因素影响形成的实际等效偏振串扰点,L为光纤环的长度,等效串扰点距离光线环两端尾纤熔接点的长度分别为Z和$L-Z$。接下来将对I-IFOG光路中的耦合器和相位调制器的偏振误差进行分析,并建立相应的琼斯矩阵模型[20]。

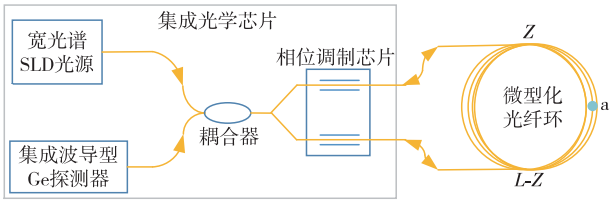


图1 集成光纤陀螺光路结构图

在I-IFOG集成光路中,系统基于硅基光波导设计了前后两个Y型分支,由两个3 dB耦合器实现光的合束与分束。单端波导在耦合区域中分成两个波导,传输的光信号进行能量重新分配,分成顺时针和逆时针两束光,分别进入微型光纤环。

SLD光源发出的光为高偏振的单色光,可以看作非偏振光和完全偏振光的叠加,其中P表示光源偏振度,ξ和ζ分别为偏振光的椭圆度角和椭圆方位角,光源的相干矩阵可以表示为[21]:

$$\boldsymbol{J}_{\mathrm{in}}=\frac{\boldsymbol{I}_{\mathrm{in}}}{2}\begin{bmatrix}1+P\cos(2\zeta)\cos(2\xi) & P\left[\sin(2\zeta)\cos(2\xi)-\mathrm{j}\sin\left(2\xi\right)\right]\\ P\left[\sin(2\zeta)\cos(2\xi)+\mathrm{j}\sin\left(2\xi\right)\right] & 1-P\cos(2\zeta)\cos(2\xi)\end{bmatrix} \tag{1}$$

光在耦合器中的正向传播对应的透射(T)和耦合(C)路径的琼斯矩阵分别为：

$$\boldsymbol{K}_{i\mathrm{T}}=\left(1-\gamma_i\right)^{1/2}\left(1-\kappa_i\right)^{1/2}\exp\left(\mathrm{j}\frac{\pi}{4}\right)\begin{bmatrix}1&0\\0&1\end{bmatrix} \tag{2}$$

$$\boldsymbol{K}_{i\mathrm{C}}=\left(1-\gamma_i\right)^{1/2}\kappa_i^{1/2}\exp\left(-\mathrm{j}\frac{\pi}{4}\right)\begin{bmatrix}1&0\\0&1\end{bmatrix} \tag{3}$$

式中，γ_i和κ_i分别是集成波导耦合器的附加损耗与实际的分光耦合分光系数，i可以取1和2，分别对应光沿前后两个Y分支耦合器正向传播的琼斯矩阵。

耦合器制造误差导致的偏振误差可以忽略不计，分光系数按照50∶50耦合器计算，不考虑分光损耗。公式(2)和(3)可以简化为：

$$\boldsymbol{K}_{\mathrm{T}}=\frac{1}{\sqrt{2}}\exp\left(\mathrm{j}\frac{\pi}{4}\right)\begin{bmatrix}1&0\\0&1\end{bmatrix} \tag{4}$$

$$\boldsymbol{K}_{\mathrm{C}}=\frac{1}{\sqrt{2}}\exp\left(-\mathrm{j}\frac{\pi}{4}\right)\begin{bmatrix}1&0\\0&1\end{bmatrix} \tag{5}$$

当光信号在集成多功能相位调制器芯片中传输时，由于芯片基于铌酸锂材料，采用退火质子交换工艺构建了两条单偏振波导通道，仅允许TE模通过，而TM模则由于高传输损耗会泄漏至基底中并被辐射掉。通过光刻和电镀等工艺，形成了推挽结构的调制电极。该芯片具备起偏和相位调制的功能，等效于集成了偏振器与相位调制器。

集成多功能相位调制器的振幅消光系数表示为ε，其定义为偏振器主传输轴与抑制轴上光信号振幅的比值[22]。消光比同样可以用于衡量偏振器的性能，它与消光系数的关系为：

$$\eta=-10\log\varepsilon^2 \tag{6}$$

消光系数ε越小，消光比η越大，集成芯片的起偏性能越好，其琼斯矩阵为：

$$\boldsymbol{P}=\begin{bmatrix}1&0\\0&\varepsilon\end{bmatrix} \tag{7}$$

在调制电极上施加电压后，会产生调制电场，进而通过改变波导的折射率来对传输的光信号进行相位调制。设定产生的调制相位为$\phi_{\mathrm{m}}(t)$，由于顺时针(CW)和逆时针(CCW)光信号通过集成相位调制器的时间不同，存在一个时间差，这个时间差即为光纤环的渡越时间τ。以顺时针光为参考，逆时针光的调制信号将会出现相位滞后。顺逆时针光信号经过多功能集成相位调制器后，其等效琼斯矩阵可以表述为：

$$\boldsymbol{M}_{\mathrm{CW}}=\begin{bmatrix}e^{\mathrm{j}\phi_{\mathrm{m}}(t)}&0\\0&e^{\mathrm{j}\phi_{\mathrm{m}}(t)}\end{bmatrix} \tag{8}$$

$$\boldsymbol{M}_{\mathrm{CCW}}=\begin{bmatrix}e^{\mathrm{j}\phi_{\mathrm{m}}(t-\tau)}&0\\0&e^{\mathrm{j}\phi_{\mathrm{m}}(t-\tau)}\end{bmatrix} \tag{9}$$

经过相位调制后的顺逆时针信号光进入光纤环路，假设由0到Z位置为顺时针方向，则Z到0为逆时针方向，L点处为光纤环中累计的偏振串扰的等效串扰点，微型光纤环中光沿集成光路顺逆时针传播时的琼斯矩阵分别为：

$$\begin{aligned}\boldsymbol{T}_{\mathrm{CW}}&=\begin{bmatrix}1&0\\0&e^{-\mathrm{j}\Delta\beta Z}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\cos\theta&\sin\theta\\-\sin\theta&\cos\theta\end{bmatrix}\begin{bmatrix}1&0\\0&e^{-\mathrm{j}\Delta\beta(L-Z)}\end{bmatrix}\\&=\begin{bmatrix}\cos\theta&\sin\theta e^{-\mathrm{j}\Delta\beta(L-Z)}\\-\sin\theta e^{-\mathrm{j}\Delta\beta Z}&\cos\theta e^{-\mathrm{j}\Delta\beta L}\end{bmatrix}\end{aligned} \tag{10}$$

$$\begin{aligned}\boldsymbol{T}_{\mathrm{CCW}}&=\begin{bmatrix}1&0\\0&e^{-\mathrm{j}\Delta\beta Z}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\cos\theta&-\sin\theta\\\sin\theta&\cos\theta\end{bmatrix}\begin{bmatrix}1&0\\0&e^{-\mathrm{j}\Delta\beta(L-Z)}\end{bmatrix}\\&=\begin{bmatrix}\cos\theta&-\sin\theta e^{-\mathrm{j}\Delta\beta Z}\\\sin\theta e^{-\mathrm{j}\Delta\beta(L-Z)}&\cos\theta e^{-\mathrm{j}\Delta\beta L}\end{bmatrix}\end{aligned} \tag{11}$$

式中，$\Delta\beta$是当光纤弯曲时的归一化双折射改变量，θ是微型光纤环内等效偏振面旋转角度。

1.2　光路传输模型

根据集成器件的琼斯矩阵，构建整个集成光学路径的传输模型。整个光学系统的传输矩阵为按照光通过每个光学元件先后顺序，将各光学器件传输矩阵相乘[23]。

以方波调制为例，存在两个调制状态，当调制深度为$\pi/2$时：

$$\phi_{\mathrm{m}}(t)-\phi_{\mathrm{m}}(t-\tau)=\pi/2 \tag{12}$$

对应当调制深度为$-\pi/2$时有：

$$\phi_{\mathrm{m}}(t)-\phi_{\mathrm{m}}(t-\tau)=-\pi/2 \tag{13}$$

在半个调制周期内，顺时针和逆时针传播的光路径的琼斯矩阵分别表示为公式(14)和(15)：

$$\begin{aligned}\boldsymbol{G}_{\mathrm{CW}}&=\boldsymbol{K}_{1\mathrm{C}}{}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{K}_{2\mathrm{C}}{}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{M}_{\mathrm{CW}}e^{\mathrm{j}\frac{\phi_s+\phi_l}{2}}\boldsymbol{T}_{\mathrm{CW}}\boldsymbol{P}\boldsymbol{K}_{2\mathrm{T}}\boldsymbol{K}_{1\mathrm{T}}\\&=\frac{1}{4}\begin{bmatrix}1&0\\0&\varepsilon\end{bmatrix}\cdot e^{\mathrm{j}\frac{\pi}{4}}\cdot e^{\mathrm{j}\frac{\phi_s+\phi_l}{2}}\cdot\begin{bmatrix}\cos\theta&\sin\theta e^{-\mathrm{j}\Delta\beta(L-Z)}\\-\sin\theta e^{-\mathrm{j}\Delta\beta Z}&\cos\theta e^{-\mathrm{j}\Delta\beta L}\end{bmatrix}\cdot\begin{bmatrix}1&0\\0&\varepsilon\end{bmatrix}\\&=\frac{1}{4}\begin{bmatrix}\cos\theta e^{\mathrm{j}\left(\frac{\pi}{4}+\frac{\phi_s+\phi_l}{2}\right)}&\varepsilon\sin\theta e^{\mathrm{j}\left(\frac{\phi_s+\phi_l}{2}+\frac{\pi}{4}-\Delta\beta(L-Z)\right)}\\-\varepsilon\sin\theta e^{\mathrm{j}\left(\frac{\phi_s+\phi_l}{2}+\frac{\pi}{4}-\Delta\beta Z\right)}&\varepsilon^2\cos\theta e^{\mathrm{j}\left(\frac{\pi}{4}+\frac{\phi_s+\phi_l}{2}-\Delta\beta L\right)}\end{bmatrix}\end{aligned} \tag{14}$$

$$\begin{aligned}\boldsymbol{G}_{\mathrm{CCW}}&=\boldsymbol{K}_{1\mathrm{C}}{}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{K}_{2\mathrm{T}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{M}_{\mathrm{CCW}}e^{-\mathrm{j}\frac{\phi_s+\phi_f}{2}}\boldsymbol{T}_{\mathrm{CCW}}\boldsymbol{P}\boldsymbol{K}_{2\mathrm{C}}\boldsymbol{K}_{1\mathrm{T}}\\&=\frac{1}{4}\begin{bmatrix}1&0\\0&\varepsilon\end{bmatrix}\cdot e^{-\mathrm{j}\frac{\pi}{4}}\cdot e^{-\mathrm{j}\frac{\phi_s+\phi_f}{2}}\cdot\begin{bmatrix}\cos\theta&-\sin\theta e^{-\mathrm{j}\Delta\beta Z}\\\sin\theta e^{-\mathrm{j}\Delta\beta(L-Z)}&\cos\theta e^{-\mathrm{j}\Delta\beta L}\end{bmatrix}\cdot\begin{bmatrix}1&0\\0&\varepsilon\end{bmatrix}\\&=\frac{1}{4}\begin{bmatrix}\cos\theta e^{-\mathrm{j}\left(\frac{\pi}{4}+\frac{\phi_s+\phi_f}{2}\right)}&-\varepsilon\sin\theta e^{-\mathrm{j}\left(\frac{\phi_s+\phi_f}{2}+\frac{\pi}{4}+\Delta\beta Z\right)}\\\varepsilon\sin\theta e^{-\mathrm{j}\left(\frac{\phi_s+\phi_f}{2}+\frac{\pi}{4}+\Delta\beta(L-Z)\right)}&\varepsilon^2\cos\theta e^{-\mathrm{j}\left(\frac{\pi}{4}+\frac{\phi_s+\phi_f}{2}+\Delta\beta L\right)}\end{bmatrix}\end{aligned}\tag{15}$$

式中，ϕ_f和ϕ_s分别表示微型光纤环快轴和慢轴的相位。

当光在半个调制周期内以调制深度为$-\pi/2$分别沿顺时针和逆时针方向通过集成光路时，可以推导出对应的琼斯矩阵。顺逆时针集成光路的琼斯矩阵表示为：

$$\begin{aligned}\boldsymbol{G}_{\mathrm{CW}}{}'&=\boldsymbol{K}_{1\mathrm{C}}{}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{K}_{2\mathrm{C}}{}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{M}_{\mathrm{CW}}e^{\mathrm{j}\frac{\phi_s+\phi_f}{2}}\boldsymbol{T}_{\mathrm{CW}}\boldsymbol{P}\boldsymbol{K}_{2\mathrm{T}}\boldsymbol{K}_{1\mathrm{T}}\\&=\frac{1}{4}\begin{bmatrix}1&0\\0&\varepsilon\end{bmatrix}\cdot e^{-\mathrm{j}\frac{\pi}{4}}\cdot e^{\mathrm{j}\frac{\phi_s+\phi_f}{2}}\cdot\begin{bmatrix}\cos\theta&\sin\theta e^{-\mathrm{j}\Delta\beta(L-Z)}\\-\sin\theta e^{-\mathrm{j}\Delta\beta Z}&\cos\theta e^{-\mathrm{j}\Delta\beta L}\end{bmatrix}\cdot\begin{bmatrix}1&0\\0&\varepsilon\end{bmatrix}\\&=\frac{1}{4}\begin{bmatrix}\cos\theta e^{\mathrm{j}\left(-\frac{\pi}{4}+\frac{\phi_s+\phi_f}{2}\right)}&\varepsilon\sin\theta e^{\mathrm{j}\left(\frac{\phi_s+\phi_f}{2}-\frac{\pi}{4}-\Delta\beta(L-Z)\right)}\\-\varepsilon\sin\theta e^{\mathrm{j}\left(\frac{\phi_s+\phi_f}{2}-\frac{\pi}{4}-\Delta\beta Z\right)}&\varepsilon^2\cos\theta e^{\mathrm{j}\left(-\frac{\pi}{4}+\frac{\phi_s+\phi_f}{2}-\Delta\beta L\right)}\end{bmatrix}\end{aligned}\tag{16}$$

$$\begin{aligned}\boldsymbol{G}_{\mathrm{CCW}}{}'&=\boldsymbol{K}_{1\mathrm{C}}{}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{K}_{2\mathrm{T}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{M}_{\mathrm{CCW}}e^{-\mathrm{j}\frac{\phi_s+\phi_f}{2}}\boldsymbol{T}_{\mathrm{CCW}}\boldsymbol{P}\boldsymbol{K}_{2\mathrm{C}}\boldsymbol{K}_{1\mathrm{T}}\\&=\frac{1}{4}\begin{bmatrix}1&0\\0&\varepsilon\end{bmatrix}\cdot e^{\mathrm{j}\frac{\pi}{4}}\cdot e^{-\mathrm{j}\frac{\phi_s+\phi_f}{2}}\cdot\begin{bmatrix}\cos\theta&-\sin\theta e^{-\mathrm{j}\Delta\beta Z}\\\sin\theta e^{-\mathrm{j}\Delta\beta(L-Z)}&\cos\theta e^{-\mathrm{j}\Delta\beta L}\end{bmatrix}\cdot\begin{bmatrix}1&0\\0&\varepsilon\end{bmatrix}\\&=\frac{1}{4}\begin{bmatrix}\cos\theta e^{-\mathrm{j}\left(-\frac{\pi}{4}+\frac{\phi_s+\phi_f}{2}\right)}&-\varepsilon\sin\theta e^{-\mathrm{j}\left(\frac{\phi_s+\phi_f}{2}-\frac{\pi}{4}+\Delta\beta Z\right)}\\\varepsilon\sin\theta e^{-\mathrm{j}\left(\frac{\phi_s+\phi_f}{2}-\frac{\pi}{4}+\Delta\beta(L-Z)\right)}&\varepsilon^2\cos\theta e^{-\mathrm{j}\left(-\frac{\pi}{4}+\frac{\phi_s+\phi_f}{2}+\Delta\beta L\right)}\end{bmatrix}\end{aligned}\tag{17}$$

整个集成光路的传输矩阵为顺逆时针传输矩阵的相加，表示为：

$$\boldsymbol{G}=\boldsymbol{G}_{\mathrm{CW}}+\boldsymbol{G}_{\mathrm{CCW}}\tag{18}$$

最终在光电探测器处输出光的相干矩阵可以用光源相干矩阵（即输入光相干矩阵$\boldsymbol{J}_{\mathrm{in}}$）经过琼斯矩阵为$\boldsymbol{G}$的集成光路来表示：

$$\boldsymbol{J}_{\mathrm{out}}=\boldsymbol{G}\cdot\boldsymbol{J}_{\mathrm{in}}\cdot\boldsymbol{G}^{\mathrm{H}}=\begin{bmatrix}J_{11}&J_{12}\\J_{21}&J_{22}\end{bmatrix}\tag{19}$$

通过求输出光相干矩阵的迹可以得到输出光强，$\pi/2$和$-\pi/2$周期内的输出光强分别表示为：

$$I_{\mathrm{out1}}=\mathrm{Tr}\left[\boldsymbol{J}_{\mathrm{out}}\right]=J_{11}+J_{22}\tag{20}$$

$$I_{\mathrm{out2}}=\mathrm{Tr}\left[\boldsymbol{J}_{\mathrm{out}}{}'\right]=J_{11}{}'+J_{22}{}'\tag{21}$$

采用方波调制时信号解调原理是分别采样$\pi/2$和$-\pi/2$周期内的输出光强I_{out1}和I_{out2}，两个状态光强的差值为解调输出光强：

$$I_{\mathrm{out}}=\frac{1}{2}\left(I_{\mathrm{out1}}+I_{\mathrm{out2}}\right)\tag{22}$$

结合公式（14）～（22），由于ε的值较小，可以忽略高阶项。使用辅助角公式化简计算可得：

$$\begin{aligned}16I_{\mathrm{out}}&=A_2\sin(\phi_s+\phi_f)-A_1\cos(\phi_s+\phi_f)\\&=A\sin(\phi_s+\phi_f-\phi_e)\end{aligned}\tag{23}$$

$$A_1=I_{\mathrm{in}}\varepsilon P\cos\theta\sin\theta\begin{bmatrix}\cos 2\xi\sin 2\zeta\begin{pmatrix}\sin\Delta\beta Z+\\\sin\Delta\beta(L-Z)\end{pmatrix}\\-\sin 2\xi\begin{pmatrix}\cos\Delta\beta Z+\\\cos\Delta\beta(L-Z)\end{pmatrix}\end{bmatrix}\tag{24}$$

$$A_2=I_{\mathrm{in}}\begin{bmatrix}\cos^2\theta+P\cos 2\zeta\cos 2\xi\cos^2\theta+\varepsilon P\sin 2\xi\cos\theta\sin\theta\left(\sin\Delta\beta(L-Z)-\sin\Delta\beta Z\right)+\\\varepsilon P\cos 2\xi\sin 2\zeta\cos\theta\sin\theta\left(\cos\Delta\beta(L-Z)-\cos\Delta\beta Z\right)\end{bmatrix}\tag{25}$$

式中，ϕ_e是相位移误差，I_{in}为输入光强即光源光强。

集成式光纤陀螺由于偏振误差所引起的相位移误差的表达式为：

$$\phi_e=\arctan\frac{A_1}{A_2}\tag{26}$$

代入A_1和A_2可以得到：

$$\phi_e=\arctan\frac{\varepsilon P\sin\theta\left[B_1-B_2\right]}{\cos\theta+P\cos 2\zeta\cos 2\xi\cos\theta+C_1+C_2}\tag{27}$$

$$\begin{cases} B_1 = \cos 2\xi \sin 2\zeta\left(\sin \Delta\beta Z + \sin \Delta\beta (L - Z)\right) \\ B_2 = \sin 2\xi\left(\cos \Delta\beta Z + \cos \Delta\beta (L - Z)\right) \\ C_1 = \varepsilon P \sin 2\xi \sin\theta\left(\sin \Delta\beta (L - Z) - \sin \Delta\beta Z\right) \\ C_2 = \varepsilon P \cos 2\xi \sin 2\zeta \sin\theta\left(\cos \Delta\beta (L - Z) - \cos \Delta\beta Z\right) \end{cases} \tag{28}$$

1.3　信号光偏振度仿真

可以看出，集成 IFOG 偏振误差与光源偏振度、光路消光比、保偏光纤双折射、偏振旋转等诸多变量相关。对于集成光学芯片，可以通过优化光源偏振度和光路偏振消光比来提升信号光的偏振消光比。根据所设计集成光路的具体参数对信号光偏振度进行仿真分析，可得到信号光偏振度对误差相移的影响程度，以及与陀螺解调输出光强的关系。

取集成光源的中心波长为 λ=1 310 nm，耦合器分束比理想情况下设为 50∶50，忽略波导耦合器中的损耗和串扰。基于公式(23)，进行信号光偏振度仿真，计算了由偏振串扰引起非互易性导致的陀螺误差相位移与偏振度 P 的变化关系，如图 2 所示。

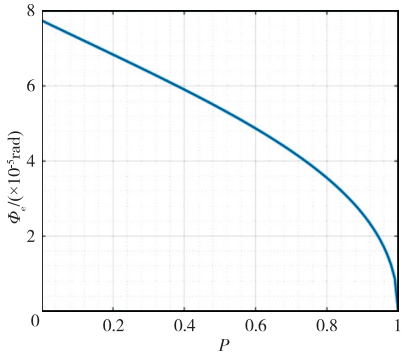


图 2　陀螺误差相位移与偏振度 P 的变化关系

从仿真结果可以看出，偏振度 P 的提高会导致偏振误差相位移逐渐减小。当 P 趋近于 1 时，偏振误差相位移趋于零。因此，提高信号光的偏振度可以有效降低由偏振串扰引起的非互易性误差相位移。如图 3 所示为对不同偏振度(0.2，0.4，0.6 和 0.8)的信号光输出进行仿真，得到不同偏振度下 I-IFOG 光强输出波形。

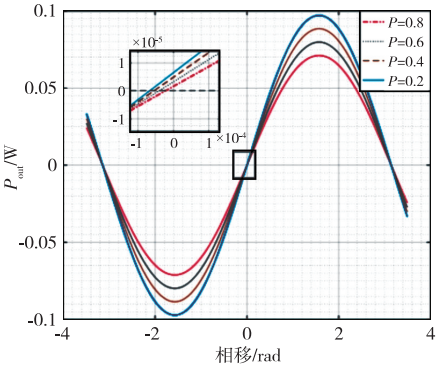


图 3　不同偏振度信号光的光强输出波形

通过分析可知提高系统信号光的偏振度可以抑制偏振误差，提升集成光纤陀螺的测量精度。

2　偏振误差抑制方法

信号光的偏振度对 I-IFOG 性能的影响主要表现在其引起的相位噪声和相位偏置的漂移。在进行集成光路设计时应尽量保持信号光偏振态的稳定，本研究为了避免不同偏振态串扰导致的非互易性噪声，采用高消光比起偏器件保证进入全保偏集成光路的光具有足够高且稳定的偏振度，有效抑制 I-IFOG 输出偏振误差，提高陀螺输出精度。

为了提升信号光消光比，设计了一种基于硅基定向耦合器型的波导起偏器。起偏器基于定向耦合器中的耦合模理论[24]，通过设计波导尺寸使其满足所需模式的模场尺寸，只传输所需模式，从而达到起偏(偏振滤波)的效果。在相位调制器两分支之后引入起偏器结构，对顺逆时针回路进入微型保偏光纤环的光进行偏振滤波。该起偏器能够消除集成光路中的寄生偏振误差，提升信号光的消光比，从而有效抑制由偏振光串扰引入的非互易性噪声而导致的偏振误差。

所设计的硅基定向耦合器型波导起偏器结构如图 4 所示，由三个波导分支构成：中间为条形硅波导，两侧对称布置混合等离子波导。混合波导的底层为高折射率的硅(Si)，中间为低折射率的二氧化硅(SiO_2)，上层为具有较大吸收损耗的铬(Cr)金属，最外层包覆空气。该波导结构被制备在 SiO_2 掩埋层上，整体由三个部分组成：两端为条形波导输入/输出段，中间为混合波导耦合起偏段。当光波导的结构参数满足耦合模条件时，光场沿波导发生光场演化和模式耦合。当信号光进入时，TE 模沿中间的条形直波导传输。由于 TE 模和 TM 模在波导中的传输常数不同，在如图 4 所示的耦合长度为 L 的耦合区域，两种模式发生分离，L 为 TM 模式完全耦合进入两侧混合等离子波导的长度。TM 模与 TE 模有效分离并耦合至两侧混合等离子体波导中，TM 模被混合等离子顶层的 Cr 层完全吸收，最终只有 TE 模通过，实现了起偏和偏振滤波的功能。

所设计的硅基耦合器型波导起偏器的工作波长为 1.31 μm。在此波长下，Si 的折射率为 3.503，SiO_2 为 1.466，Cr 混合等离子层的折射率为 5.41+

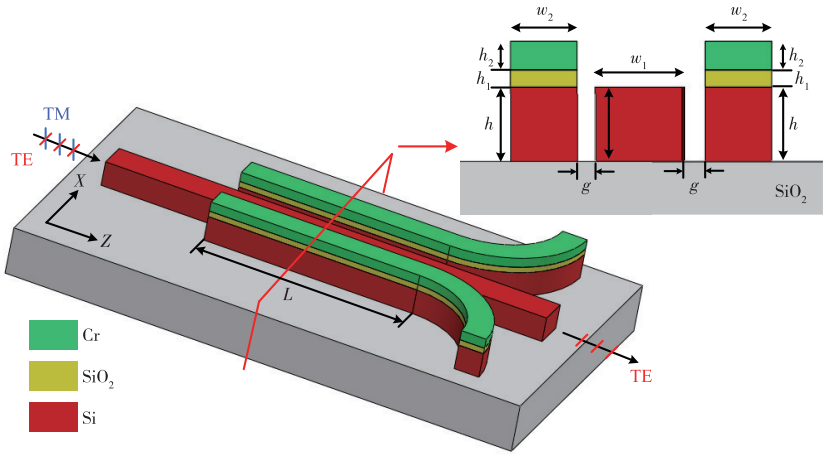
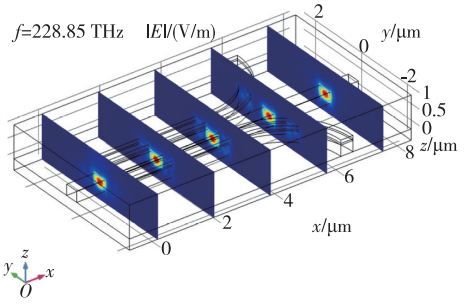


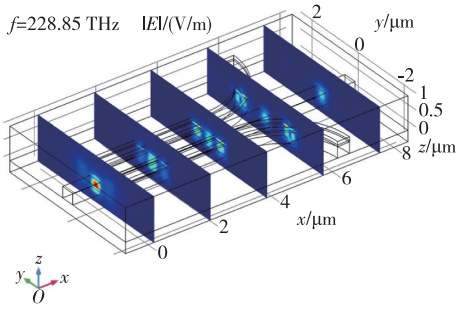
图4 硅基耦合器型波导起偏器结构示意图

i4.759。条形波导与两侧混合等离子体波导的距离g为100 nm,耦合起偏区的长度L为4.1 μm。两侧混合等离子体波导金属层厚度h_2为100 nm,SiO_2层厚度h_1为50 nm,以增加对TM模的吸收损耗。混合波导硅层高度与条形波导一致,均为340 nm。为使TM模有效耦合到混合等离子波导,需要使TM模式满足截止条件,在折射率差界面发生辐射,从而使TM模辐射进金属层。模式传播的截止条件与折射率差和波导厚度有直接关系,基于这一条件,通过仿真计算对波导几何参数进行设计,可以得到波导结构参数。在本研究中,等离子体波导宽度w_2为399 nm,并确定条形波导宽度w_1为437 nm。此时,条形波导中TE模的有效折射率与混合波导中的TM模折射率差异较大,约为1.1,确保TE模无法耦合到两侧波导。为了防止TM模重新耦合回条形波导并增加其吸收损耗,在混合波导的末端设计了一段90°弯曲波导增强TM模式的辐射。通过该设计,两侧混合等离子波导吸收效率提升两倍。TM模耦合到混合波导并被金属Cr层吸收,最终达到起偏(模式滤波)的效果。

依据设计的具体参数,实验利用仿真软件的波动光学模块,建立了起偏器的三维结构模型。在给定电磁波频率的基础上,通过设置面外方向传播的电磁波模式以及散射边界条件,模拟了通过波导起偏器内的模场传输分布。图5(a)是TE模在所设计的波导起偏器中的传输模场分布,可以看出,TE模不受两侧分布的混合等离子波导影响,完全沿着中间的条形波导进行传输。图5(b)是基模(即同时存在TE模和TM模)的传输模场分布图,可以看出,TM模传输时在耦合起偏段会逐渐高效地耦合到两侧的混合等离子波导中,并逐渐被吸收,最后条形波导中只存在TE模。



(a) TE模场分布图



(b) TM模场分布图

图5 硅基耦合器型波导起偏器中沿电磁场传播方向的切面模场分布图

基于本研究提出的波导起偏器的集成光学芯片结构如图6所示。光源、探测器和Y波导集成在SiO_2衬底上,在相位调制器前及互易性端口前增加所提出的起偏器结构。光学调制器基于铌酸锂($LiNbO_3$)材料实现起偏、分光以及相位调制。相位调制芯片通过端面耦合方式实现与硅基芯片的混合集成。首先,对于硅基芯片部分,采用硅光波导集成工艺,对传输波导、Y波导以及起偏器进行整体

设计与优化；光源部分为 InP 材料的 SLD 芯片；探测器部分为 InGaAs 材料的 PIN 芯片。通过晶圆键合工艺实现光路对准和端面耦合，形成组合芯片。集成光学芯片通过热沉安装在半导体制冷器（Thermo Electric Cooler，TEC）上，通过温度控制电路保证光源输出的稳定性。最后，通过电气接口引线设计及封装工艺对集成光学芯片进行固化封装。

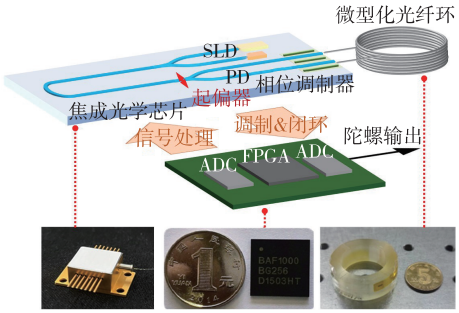


图 6　集成方案示意图以及实物图

3　实验测试及验证

为验证集成光学芯片的保偏能力，搭建了集成光纤陀螺实验测试平台，使用偏振分析仪测试了芯片输出光的偏振度和消光比，以衡量其偏振保持能力，并记录了集成式光纤陀螺对地球转速的测量数据，进行实验分析。

首先，利用偏振分析仪对集成光纤陀螺样机进行测试（如图 7 所示），测试结果如图 8 所示。图 8（a）展示了传统集成陀螺光学芯片（型号为 IGC15YA5513）输出光的测试结果，其偏振度为 0.910 3，偏振消光比为 13.270 1。如图 8（b）所示，基于新型偏振器的集成陀螺光学芯片输出光的偏振度为 0.975 5，偏振消光比为 18.550 7。与传统起偏器相比，信号光的偏振度提升了 7.16%，偏振消光比提升了 39.8%。

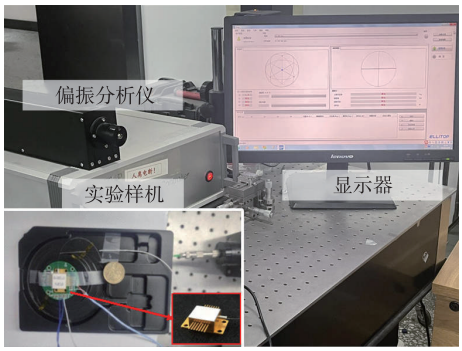
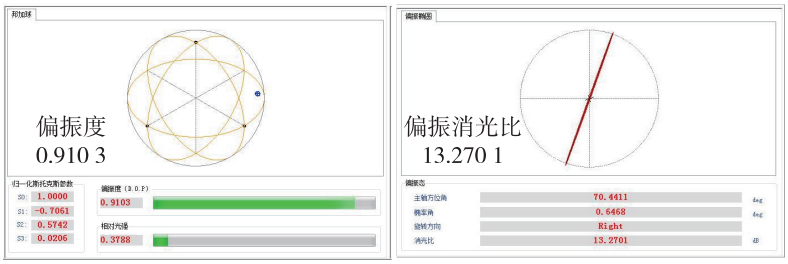
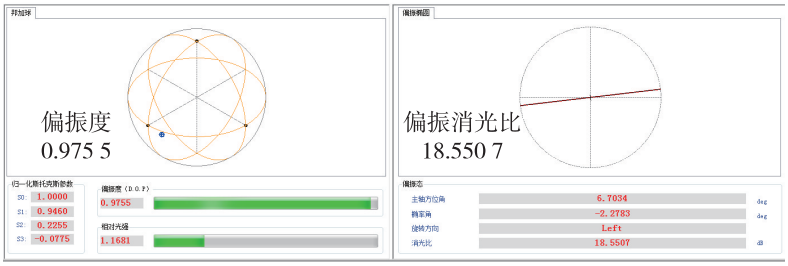


图 7　偏振分析仪及实验样机实物照片



（a）传统集成陀螺光学芯片输出信号光的偏振度与偏振消光比测试结果



（b）基于新型起偏器的集成陀螺光学芯片输出信号光的偏振度与偏振消光比测试结果

图 8　信号光的偏振度与偏振消光比测试结果

然后，将基于具有高偏振消光比的集成光学模块与保偏光纤环相熔接，搭建 I-IFOG 陀螺样机。实验装置如图 9 所示。对 I-IFOG 试验样机的静态性能进行测试，测量了地球自转速度。如图 10 所示为两小时样机测试的输出数据。

为验证偏振误差抑制方案在陀螺样机中的效果，对陀螺仪的输出数据进行 100 秒平滑处理，并计算数据的标准偏差，得出了陀螺仪的偏置稳定性。根据测试结果，本课题设计和搭建的 I-IFOG 样机在 100 秒平滑条件下的零偏稳定性为 0.112 9 (°)/h。

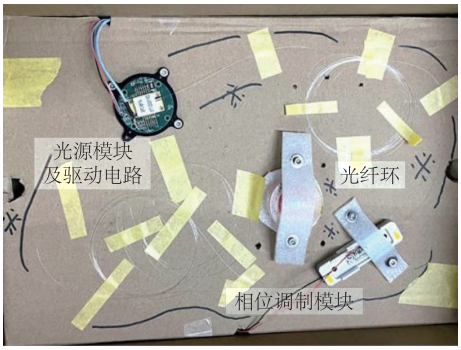


图9 集成干涉式光纤陀螺试验样机

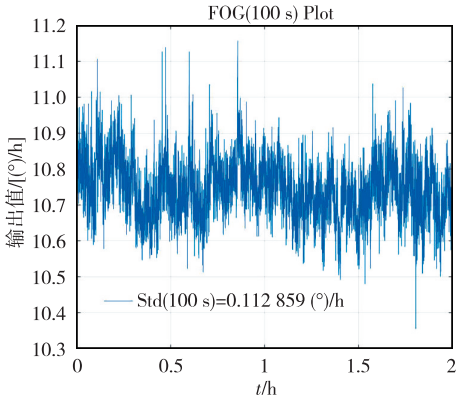


图10 使用100秒平滑处理后I-IFOG试验样机的原始数据

表1为偏振误差抑制的集成光纤陀螺与同类型集成光纤陀螺常温测试数据的对比。通过对比可知,本研究研制的集成化光纤陀螺与美国KVH公司的P-1775陀螺相比,尺寸更小、精度更高。与目前最小的由俄罗斯Fizoptika公司研制的VG191AD陀螺相比,精度有明显优势。

表1 偏振误差抑制的集成光纤陀螺与同类型集成光纤陀螺常温测试对比

I-IFOG型号	整机尺寸/mm^2	零偏稳定性/[(°)·h^{-1}]
本文	ϕ40×30	0.112 9
KVH P-1775	ϕ44.5×73.7	0.239
VG191AD	ϕ24×48	1

4 结论

针对现阶段光纤陀螺仪集成后所产生的偏振误差问题,开展了偏振误差的理论分析,基于琼斯矩阵建立了光路的偏振误差模型并推导出I-FIOG的相位误差模型。结合理论提出了一种新型硅基耦合器型波导起偏器结构,可以有效抑制偏置误差的产生。通过实验验证了片上起偏器来提高信号光偏振消光比可以有效提高陀螺精度。接下来,将进一步验证优化后的集成光纤陀螺的测量稳定性以及实际工作环境下的环境适应性,以期完善集成光纤陀螺的研究。

参考文献:

[1] 尚克军,雷 明,李豪伟,等. 集成化光纤陀螺设计、制造及未来发展[J]. 中国惯性技术学报, 2021, 29(4): 502-509.
Shang Kejun, Lei Ming, Li Haowei, et al. Design, manufacturing and future development of the integrated fiber optic gyroscope[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2021, 29(4): 502-509.

[2] Song N, Xu X, Zhang Z, et al. Advanced interferometric fiber optic gyroscope for inertial sensing: A review[J]. Journal of Lightwave Technology, 2023, 41(13): 4023-4034.

[3] 张祖琛,郭治宇,于雪柯,等. 光学陀螺小型化发展现状及趋势[C]// 第五届全国自主导航学术会议(CCAN2021)论文集——下一代轻小型、快响应惯性导航技术, 2021: 13-21.

[4] Lefevre H. The Fiber-Optic Gyroscope, Third Edition[M]. Boston: Artech, 2022.

[5] Noureldin A, Irvine-Halliday D, Mintchev M P. Accuracy limitations of FOG-based continuous measurement-while-drilling surveying instruments for horizontal wells[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2002, 51(6): 1177-1191.

[6] 吴蓓蓓. 用于硅基集成光学陀螺仪的关键器件研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2020.
Wu Beibei. Research on the key devices for silicon integrated optical gyroscope [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2020.

[7] Shang K, Lei M, Xiang Q, et al. Tactical-grade interferometric fiber optic gyroscope based on an integrated optical chip[J]. Optics Communications, 2021, 485: 126729.

[8] Rickman A. The commercialization of silicon photonics[J]. Nature Photonics, 2014, 8(8): 579-582.

[9] Zuo W, Yan M, Liu B, et al. Research on high extinction ratio Y-junction suppressing polarization coupling noise of fiber optic gyroscope[J]. Proc. SPIE, 2021: 120620S.

[10] Stopiński S, Jusza A, Piramidowicz R. Photonic integrated circuits for application in modern inertial measurement units [C]// 2018 Baltic URSI Symposium (URSI), 2018: 27-28.

[11] Komljenovic T, Huang D, Pintus P, et al. Photonic integrated circuits using heterogeneous integration on silicon [J]. Proceedings of the IEEE, 2018, 106(12): 2246-2257.

[12] Bonneville D. Low-cost and versatile fabrication of silicon-compatible photonic integrated circuits for active devices and sensors[D]. Hamilton: McMaster University, 2022.

[13] Tran M A, Komljenovic T, Hulme J C, et al. Integrated optical driver for interferometric optical gyroscopes[J]. Optics Express, 2017, 25(4): 3826-3840.

[14] Pavlath G A, Shaw H J. Birefringence and polarization effects in fiber gyroscopes[J]. Applied Optics, 1982, 21(10): 1752-

1757.

[15] Liu J, Zhang C, Gao F, et al. Method for improving the polarization extinction ratio of multifunction integrated optic circuits[J]. Optics Express, 2021, 29(18): 28096-28103.

[16] Srinivasan S, Moreira R, Blumenthal D, et al. Design of integrated hybrid silicon waveguide optical gyroscope [J]. Optics Express, 2014, 22(21): 24988-24993.

[17] Wang L, Halstead D R, Monte T D, et al. Low-cost, high-end tactical-grade fiber optic gyroscope based on photonic integrated circuit[C]// 2019 IEEE International Symposium on Inertial Sensors and Systems (INERTIAL), 2019: 1-2.

[18] 尚克军，雷　明，向　强，等. 一种基于集成光学芯片的微小型光纤陀螺[J]. 中国惯性技术学报，2020，28(5)：650-653.
Shang Kejun, Lei Ming, Xiang Qiang, et al. An integrated optical chip based miniature fiber optic gyroscope[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2020, 28(5): 650-653.

[19] 尚克军，雷　明，李豪伟，等. 集成化光纤陀螺设计、制造及未来发展[J]. 中国惯性技术学报，2021，29(4)：502-509.
Shang Kejun, Lei Ming, Li Haowei, et al. Design, manufacturing and future development of the integrated fiber optic gyroscope[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2021, 29(4): 502-509.

[20] 李亚旭. 使用保偏光环行器的光纤陀螺理论与技术[D]. 杭州：浙江大学，2021.
Li Yaxu. Theory and technology of fiber optic gyro using the polarization-maintaining optical circulator [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2021.

[21] Burns W, Moeller R. Polarizer requirements for fiber gyroscopes with high-birefringence fiber and broad-band sources[J]. Journal of Lightwave Technology, 1984, 2(4): 430-435.

[22] 廖延彪. 偏振光学[M]. 北京：科学出版社，2003.

[23] Kintner E C. Polarization control in optical-fiber gyroscopes [J]. Optics Letters, 1981, 6(3): 154-156.

[24] Yariv A, Yeh P. Photonics: Optical Electronics in Modern Communications [M]. Oxford: Oxford University Press, 2007.

作者简介：

张智子(1997—)，女，在读博士，主要从事集成化光纤陀螺研究；

王梓丞(1992—)，男，黑龙江省哈尔滨市人，博士，助理研究员，主要从事光纤惯性传感与系统技术领域的研究。