

干涉型与谐振型集成光学陀螺的比较

杨添舒 费瑶 李兆峰 刘雯 李艳 王晓东 杨富华

中国科学院半导体研究所集成技术工程研究中心, 北京 100083

摘要 对干涉型集成光学陀螺(IIOG)和谐振型集成光学陀螺(RIOG)进行了比较。为使两者具有可比性,两种陀螺采用相同参数的光路器件、相近的偏置调制方法以及相同面积和传输损耗的光波导萨尼亚克(Sagnac)效应敏感环。推导了采用方波调制的干涉型集成光学陀螺和采用三角波调制的谐振型集成光学陀螺的散粒噪声灵敏度的准确表达式,通过优化波导器件参数计算得到两种陀螺最优的散粒噪声灵敏度。结果表明:随着光波导传输损耗的降低,干涉型集成光学陀螺的散粒噪声灵敏度要优于谐振型集成光学陀螺。随着超低损耗光波导技术的发展,干涉型集成光学陀螺在精度提高上具有较大潜力。

关键词 光纤光学; 陀螺仪; 萨尼亚克效应; 平面光波导

中图分类号 TN256 文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP53.080601

Comparison Between Interferometric and Resonant Integrated Optic Gyroscopes

Yang Tianshu Fei Yao Li Zhaofeng Liu Wen Li Yan Wang Xiaodong Yang Fuhua

Engineering Research Center for Semiconductor Integrated Technology, Institute of Semiconductors,

Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China

Abstract This paper compares the interferometric integrated optic gyro (IIOG) and the resonant integrated optic gyro (RIOG). In order to make them comparable, the two kinds of gyros use devices with the same parameters, similar bias modulation methods and planar waveguides with the same footprint and the same propagation loss for Sagnac effect sensing. Firstly, the exact expressions of the shot-noise-limited sensitivities of the IIOG using the square wave modulation and the RIOG using the triangular wave modulation are derived. Then the optimized shot-noise-limited sensitivities of the two kinds of gyros are calculated by optimizing the waveguides parameters. Results show that as the propagation loss of the planar waveguide decreases, the IIOG has better shot-noise-limited sensitivity than the RIOG. As the manufacturing technology of the ultra-low loss planar waveguide develops, the IIOG has much potential in sensitivity improving.

Key words fiber optics; gyroscope; Sagnac effect; planar waveguide

OCIS codes 060.2800; 120.5790; 230.7390; 130.3120

1 引言

光纤陀螺(FOG)被广泛研究并已获得较成熟的应用^[1-4]。集成光学陀螺(IOG)使用平面光波导代替光纤获得萨尼亚克(Sagnac)效应^[5],是将 FOG 小型化、集成化的新一代陀螺仪。IOG 分为干涉型(IIOG)和谐振型(RIOG)。以目前普遍的制造水平,平面光波导的传输损耗要比光纤大得多,因而 IIOG 的波导线圈难以设计得很长,导致其散粒噪声灵敏度较差^[6],因此过去几年研究力量大多集中在 RIOG^[7-9]。由于 RIOG 使用窄带光源,而窄带光源产生的非互易性噪声较为严重,因此如何通过相位调制和解调来抑制非互易性噪

收稿日期: 2016-03-22; 收到修改稿日期: 2016-03-28; 网络出版日期: 2016-07-20

基金项目: 国家自然科学基金(61274066,61504138,61474115)

作者简介: 杨添舒(1989—),男,博士研究生,主要从事光学陀螺方面的研究。E-mail: tsyang@semi.ac.cn

导师简介: 杨富华(1961—),男,博士,研究员,博士生导师,主要从事微纳米加工技术方面的研究。

E-mail: fhyang@semi.ac.cn(通信联系人)

声是一个难点。通过改进相位调制方案,目前基于 SiO₂ 光波导谐振环的 RIOG 样机短期零偏稳定性可达 38(°)/h(积分时间为 10 s),长期零偏稳定性可达 0.05(°)/s(积分时间为 400 s),还未达到其散粒噪声所决定的极限灵敏度^[10-11]。近来超低损耗平面光波导制造技术有较大进展,传输损耗小于 0.1 dB/m 的平面光波导的生产技术已经实现^[12-13]。随着传输损耗逐渐降低,IIOG 的散粒噪声灵敏度会显著提高^[14]。另外由于采用宽带光源,在非互易性噪声抑制方面,IIOG 相比 RIOG 更具优势。本文对同等条件下的 IIOG 和 RIOG 进行了比较,在各传输损耗下通过仿真计算优化 IIOG 和 RIOG 光波导器件参数,并比较了它们的散粒噪声灵敏度。

2 设计与优化

2.1 IIOG 与 RIOG 的系统模型

IIOG 采用光波导线圈作为萨尼亚克效应敏感环并组建开环检测系统,系统模型如图 1(a)所示。超辐射发光二极管(SLD)发出的光经过 3 dB 光纤耦合器(C)后进入多功能集成光学调制器(MIOM)被分束和调制,然后进入光波导线圈中双向传播,最终返回到达光探测器(PD),PD 输出的光电流信号作为陀螺输出。RIOG 采用单圈光波导谐振环作为萨尼亚克效应敏感环并组建开环检测系统,系统模型如图 1(b)所示。可调谐激光器(LD)发出的光被多功能集成光学调制器分束和调制后,经过 3 dB 光纤耦合器进入光波导谐振环中双向传播,最终到达光探测器 PD1 和 PD2。将逆时针光路上的 PD2 与 LD 通过伺服电路(servo)连接,将激光器频率始终锁定在谐振环逆时针方向的谐振频率上,将顺时针光路上 PD1 的光电流输出作为陀螺输出。为使 IIOG 与 RIOG 具有可比性,设置如下:IIOG 与 RIOG 的光波导萨尼亚克效应敏感环均采用 Si 基 SiO₂ 波导结构,波导芯区为 6 μm×6 μm 的矩形且在 1550 nm 处折射率为 1.456,与包层折射率差为 0.75%;设定两种萨尼亚克效应敏感环占用面积相等,即 RIOG 光波导谐振环的半径等于 IIOG 光波导线圈的外径;同时设定 IIOG 与 RIOG 系统中的光源的光功率同为 P₀=1 mW,中心波长同为 λ=1550 nm,多功能集成光学调制器的插入损耗同为 γ_m=4 dB,3 dB 光纤耦合器的插入损耗同为 γ_c=0.04 dB,光纤与光波导器件连接处的耦合损耗同为 γ_j=2 dB,光探测器的光电转换量子效率同为 η=0.9,检测带宽同为 B=100 Hz。

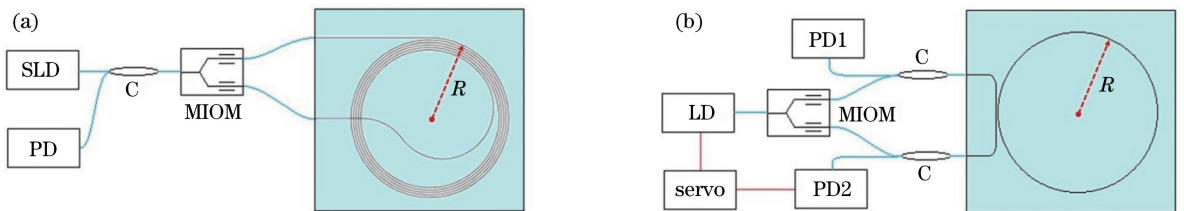


图 1 (a) IIOG 和 (b) RIOG 的系统模型

Fig. 1 System models of (a) IIOG and (b) RIOG

2.2 IIOG 散粒噪声灵敏度的优化

其他文献中常用的干涉型光学陀螺散粒噪声灵敏度公式主要针对光纤环或匝数较少的光波导线圈^[6],它们近似有一个平均半径,而在波导传输损耗较低的情况下 IIOG 光波导线圈的匝数可以很多,不能再使用平均半径进行计算。先推导出采用阿基米德螺线型光波导线圈的 IIOG 散粒噪声灵敏度的准确表达式。在 IIOG 中,MIOM 最常用方波相位偏置调制,光源发出的光经过各个器件的损耗,到达探测器的光功率可表示为

$$P_D(\varphi) = \frac{1}{8} P_0 10^{(-2\gamma_c - 2\gamma_m - 2\gamma_j - \gamma_{wg})/10} (1 + \cos \varphi), \quad (1)$$

式中 γ_{wg} 为光波导线圈的总损耗。经过方波相位偏置调制,在调制信号上半周期内 φ = φ_s + Δφ, 下半周期内 φ = φ_s - Δφ, φ_s 为萨尼亚克相位差, Δφ 为偏置相位。光功率与顺逆时针光束相位差 φ 的关系如图 2 所示。

当陀螺静止时, φ_s = 0。如图 2(a)所示,由于曲线的对称性,到达探测器的光功率为恒定值,陀螺输出恒定电流:

$$I_{Di} = \frac{\lambda e \eta}{hc} \cdot P_D(\varphi) \Big|_{\varphi = \Delta\varphi}, \quad (2)$$

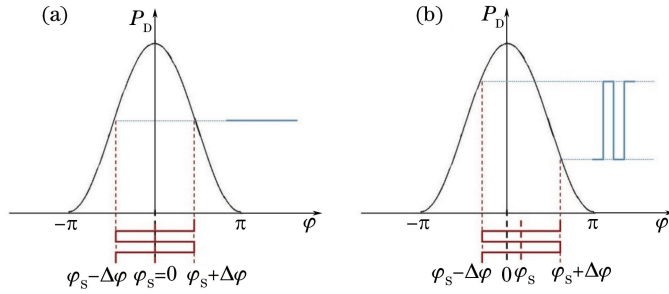


图2 IIOG (a) 静止时和 (b) 转动时到达探测器的光信号

Fig. 2 Light signal reaching the detector when IIOG is (a) static and (b) rotating

式中 e 为电子电荷量, h 为普朗克常数, c 为真空中光速。

当陀螺转动时, $\varphi_s \neq 0$ 。如图 2(b) 所示, 到达探测器的光功率为方波, 陀螺输出方波电流, 幅值为

$$I_{\text{Di,A}} \approx \frac{\lambda e \eta}{hc} \cdot \varphi_s \left. \frac{dP_D(\varphi)}{d\varphi} \right|_{\varphi=\Delta\varphi}, \quad (3)$$

方波电流幅值在小范围内与 φ_s 近似成正比。 $\varphi_s = 8\pi A \Omega / \lambda c$ 与角速度 Ω 成正比^[5], A 为波导线圈围成的面积。为使陀螺输出对转动信号的响应最大化, 应将相位偏置到曲线斜率 $dP_D(\varphi)/d\varphi$ 的最大处, 即设定相位偏置 $\Delta\varphi = \pi/2$ 。

陀螺静止时, 探测器的散粒噪声可表示为 $\sigma_{\text{shot}} = \sqrt{2eBI_{\text{Di}}}$ 。转动引起的探测器光电流方波幅值 $I_{\text{Di,A}}$ 应不小于 σ_{shot} , 否则无法被检测到。结合以上公式可推导出 IIOG 由探测器的散粒噪声所决定的最小可测量角速度为

$$\Omega_{\text{i,min}} = \frac{\lambda c}{8\pi A} \cdot \sqrt{\frac{2hcB}{\lambda\eta P_{\text{Di}}}}, \quad (4)$$

式中 $P_{\text{Di}} = \frac{1}{8} P_0 10^{(-2\gamma_c - 2\gamma_m - 2\gamma_j - \gamma_{\text{wg}})/10}$ 。

IIOG 中阿基米德螺线型光波导线圈的起始半径设定为 $R_0 = 1$ cm, 此时可忽略螺线环的弯曲损耗。外径 $R = R_0 + Nd$, N 为总匝数, 相邻螺线中心间距设定为 $d = 50$ μm , 以避免串扰。螺线环围成的面积 $A = \sum_{n=1}^N \pi (R_0 + nd)^2$, 总长 $L = \sum_{n=1}^N 2\pi (R_0 + nd)$ 。螺线环波导总损耗 γ_{wg} 主要包括传输损耗 α 、最内环波导穿出时的 X 交叉点损耗 γ_x , 即 $\gamma_{\text{wg}} = \alpha L + N\gamma_x$ 。为使 γ_x 最小, X 交叉角设计为接近 90° ^[15-16]。参考其他文献中相同波导结构的交叉角接近 90° 的 X 交叉点损耗, 设定 $\gamma_x = 0.005$ dB^[16]。

在特定传输损耗 α 下, 存在最优的螺线环匝数 N 使得 $\Omega_{\text{i,min}}$ 最小。通过 Matlab 进行计算, 在不同 α 下优化螺线环匝数 N , 得到了相应的最优 IIOG 散粒噪声灵敏度, 结果如图 3 所示。

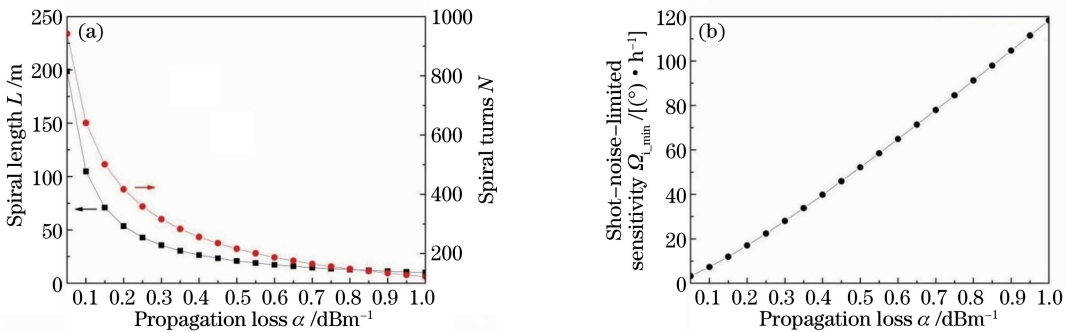


图3 不同传输损耗下 (a) 最优的螺线环匝数与对应的螺线环总长和 (b) 相应的 IIOG 散粒噪声灵敏度

Fig. 3 (a) Optimal spiral turns and corresponding spiral lengths and

(b) corresponding shot-noise-limited sensitivities of the IIOG at different propagation losses

2.3 RIOG 散粒噪声灵敏度的优化

其他文献中常用的谐振型光学陀螺散粒噪声灵敏度公式一般并未考虑具体的相位调制方法^[7,16]。在本文的RIOG中,MIOM使用三角波相位调制,因为这种调制方法产生的陀螺光输出与IIOG相似,易于比较。首先推导出三角波相位调制方法下RIOG散粒噪声灵敏度的准确表达式。光源发出的光经过各个器件的损耗,到达顺时针光路上的探测器PD1的光功率可表示为

$$P_D(f) = \frac{1}{8} P_0 10^{(-2\gamma_c - \gamma_m - 2\gamma_j - \gamma_0)/10} \left[1 - \rho \cdot \frac{\Delta f_{FWHM}^2}{\Delta f_{FWHM}^2 + 4(f - f_{CW})^2} \right], \quad (5)$$

式中 γ_0 为谐振环耦合器的插入损耗, ρ 和 Δf_{FWHM} 分别为谐振环谐振曲线的谐振深度与半峰全宽, f_{CW} 为谐振环顺时针方向的谐振频率。经过三角波相位调制,相当于对激光器频率 f_0 进行移频,在调制信号上半周期内 $f = f_0 + \Delta f$,下半周期内 $f = f_0 - \Delta f$ 。激光器频率 f_0 通过伺服电路始终锁定在谐振环逆时针方向的谐振频率 f_{CCW} 。光功率与激光频率 f 的关系如图4所示。

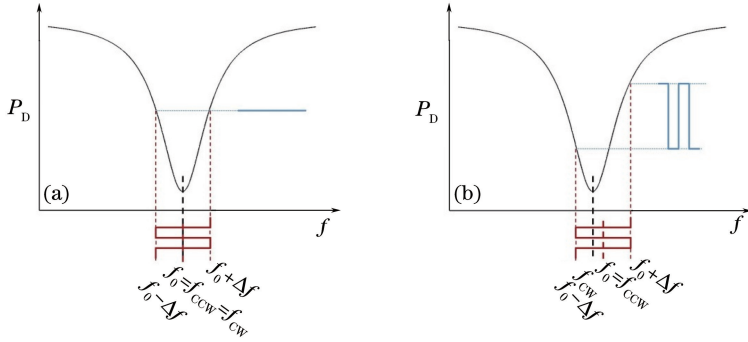


图4 RIOG (a) 静止时和 (b) 转动时到达顺时针光电探测器的光信号

Fig. 4 Light signal reaching the photodetector on the clockwise side when RIOG is (a) static and (b) rotating

当陀螺静止时, $f_0 = f_{CCW} = f_{CW}$ 。如图4(a)所示,由于曲线的对称性,到达PD1的光功率为恒定值,陀螺输出恒定电流:

$$I_{Dr} = \frac{\lambda e \eta}{hc} \cdot P_D(f) \Big|_{f=f_{CW}+\Delta f}. \quad (6)$$

当陀螺转动时, $f_0 = f_{CCW} \neq f_{CW}$ 。如图4(b)所示,到达PD1的光功率为方波,陀螺输出方波电流,幅值为

$$I_{Dr,A} \approx \frac{\lambda e \eta}{hc} \cdot (f_{CCW} - f_{CW}) \frac{dP_D(f)}{df} \Big|_{f=f_{CW}+\Delta f}, \quad (7)$$

方波电流幅值在小范围内与顺逆时针谐振频率差 $f_{CCW} - f_{CW}$ 近似成正比。顺逆时针谐振频率差 $f_{CCW} - f_{CW} = 2R\Omega/n\lambda$ 与转动角速度 Ω 成正比^[5],式中 n 为波导芯区折射率, R 为谐振环半径。为使陀螺输出对转动信号的响应最大化,应将激光器频率移频到曲线斜率 $dP_D(f)/df$ 的最大处,即设定移频量 $\Delta f = \Delta f_{FWHM}/(2\sqrt{3})$ ^[9]。

陀螺静止时,PD1的散粒噪声可表示为 $\sigma_{shot} = \sqrt{2eBI_{Dr}}$ 。转动引起的PD1光电电流方波幅值 $I_{Dr,A}$ 应不小于 σ_{shot} ,否则无法被检测到。结合以上公式可推导出RIOG由PD1散粒噪声所决定的最小可测量角速度为

$$\Omega_{r,min} = \frac{n\lambda \Delta f_{FWHM}}{2R} \cdot \frac{4 - 3\rho}{3\sqrt{3}\rho} \cdot \sqrt{\frac{2hcB}{\lambda \eta P_{Dr}}}, \quad (8)$$

式中 $P_{Dr} = \frac{1}{8} P_0 10^{(-2\gamma_c - \gamma_m - 2\gamma_j - \gamma_0)/10} \left(1 - \frac{3}{4}\rho \right)$ 。

理想谐振环谐振曲线的谐振深度 ρ 和半峰全宽 Δf_{FWHM} 由谐振环耦合器耦合系数 k 和插入损耗 γ_0 、谐振环长 $2\pi R$ 以及波导传输损耗 α 决定^[17],即:

$$\Delta f_{FWHM} = \frac{c}{2\pi^2 nR} \arccos \frac{2TV}{1 + T^2V^2}, \quad (9)$$

$$\rho = 1 - \frac{(T - V)^2 (1 + TV)^2}{(T + V)^2 (1 - TV)^2}, \quad (10)$$

式中 $T = \sqrt{1-k}$, $V = 10^{(-\alpha \cdot 2\pi R - \gamma_0)/20}$ 。

参考其他文献中相同波导结构的谐振环耦合器的插入损耗, 设定 $\gamma_0 = 0.2 \text{ dB}^{[15,18]}$ 。在特定传输损耗 α 下, 设置谐振环半径 R 等于该 α 下最优的 RIOG 螺旋环外径, 此时存在最优的谐振环耦合系数 k 使得 $\Omega_{r_{\min}}$ 最小。通过 Matlab 进行计算, 在不同 α 下优化谐振环耦合系数 k , 得到了相应的最优的 RIOG 散粒噪声灵敏度, 结果如图 5 所示。

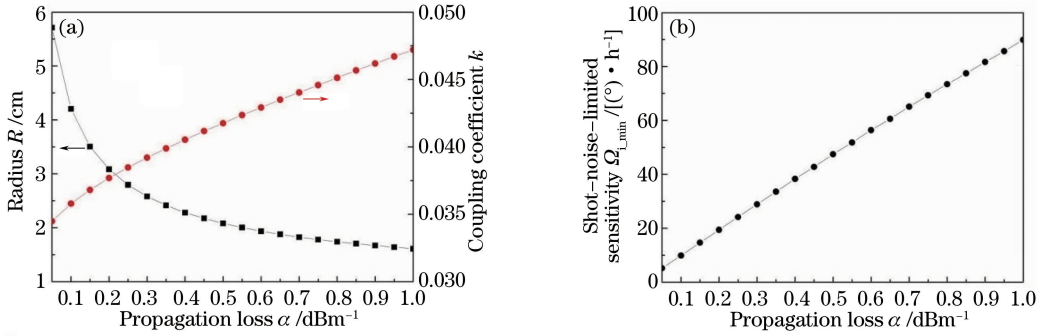


图 5 不同传输损耗下(a)设定的谐振环半径与最优的谐振环耦合器耦合系数以及(b)相应的 RIOG 散粒噪声灵敏度

Fig. 5 (a) Set radii of the resonators and the optimal coupling coefficients of the resonator couplers and (b) corresponding shot-noise-limited sensitivities of the RIOG at different propagation losses

3 结果与分析

对在不同传输损耗 α 下优化后的 IIOG 散粒噪声极限灵敏度 $\Omega_{i_{\min}}$ 和 RIOG 散粒噪声极限灵敏度 $\Omega_{r_{\min}}$ 进行比较, 它们的比值 $r = \Omega_{i_{\min}}/\Omega_{r_{\min}}$ 如图 6 所示。可见当传输损耗 α 为当前 Si 基 SiO₂ 光波导传输损耗的典型值 1 dB/m 时, RIOG 的散粒噪声灵敏度优于 IIOG; 当传输损耗 α 越小, IIOG 与 RIOG 的散粒噪声灵敏度比值越小; 当传输损耗 α 小于某值, IIOG 的散粒噪声灵敏度将优于 RIOG, 在本文设定的参数下, 该临界传输损耗为 0.35 dB/m。

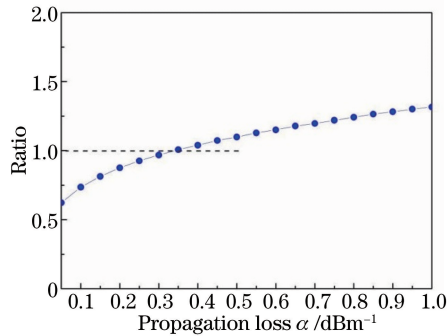


图 6 不同传输损耗下 IIOG 与 RIOG 的最优散粒噪声灵敏度的比值

Fig. 6 Ratios of the optimal shot-noise-limited sensitivities of the IIOG and the RIOG at different propagation losses

根据(4)式和(8)式, IIOG 与 RIOG 散粒噪声灵敏度的比值可表示为

$$r = \frac{\Omega_{i_{\min}}}{\Omega_{r_{\min}}} = \frac{cR}{4\pi nA \Delta f_{\text{FWHM}}} \cdot \frac{3\sqrt{3}\rho}{\sqrt{4-3\rho}} \cdot 10^{(\gamma_m + \gamma_{\text{wg}} - \gamma_0)/20}, \quad (11)$$

可见比值 r 与光源光功率 P_0 和中心波长 λ 、3 dB 光纤耦合器插入损耗 γ_c 、光纤与光波导器件连接处耦合损耗 γ_j 等参数无关, 与 MIOM 插入损耗 γ_m 以及光波导器件中的参数有关。适当改变光波导器件中的某一参数, 再分别优化 IIOG 中的螺旋环匝数 N 和 RIOG 中的谐振环耦合器耦合系数 k 以达到最优的 $\Omega_{i_{\min}}$ 和 $\Omega_{r_{\min}}$, 其比值 r 如图 7 所示。从图 7 可以看到, $\Omega_{i_{\min}}$ 和 $\Omega_{r_{\min}}$ 的比值仍然随着波导传输损耗 α 的减小而减小, 只是 IIOG 优于 RIOG 的临界传输损耗有所改变。比值 r 与 MIOM 插入损耗 γ_m 有关是因为 IIOG 中的光经过 MIOM 两次, RIOG 中的光只经过 MIOM 一次; 在其他参数固定的情况下, MIOM 的插入损耗越大,

对 IIOG 的灵敏度削弱相比 RIOG 更显著,因此比值 r 越大,但仍随波导传输损耗 α 的减小而减小。

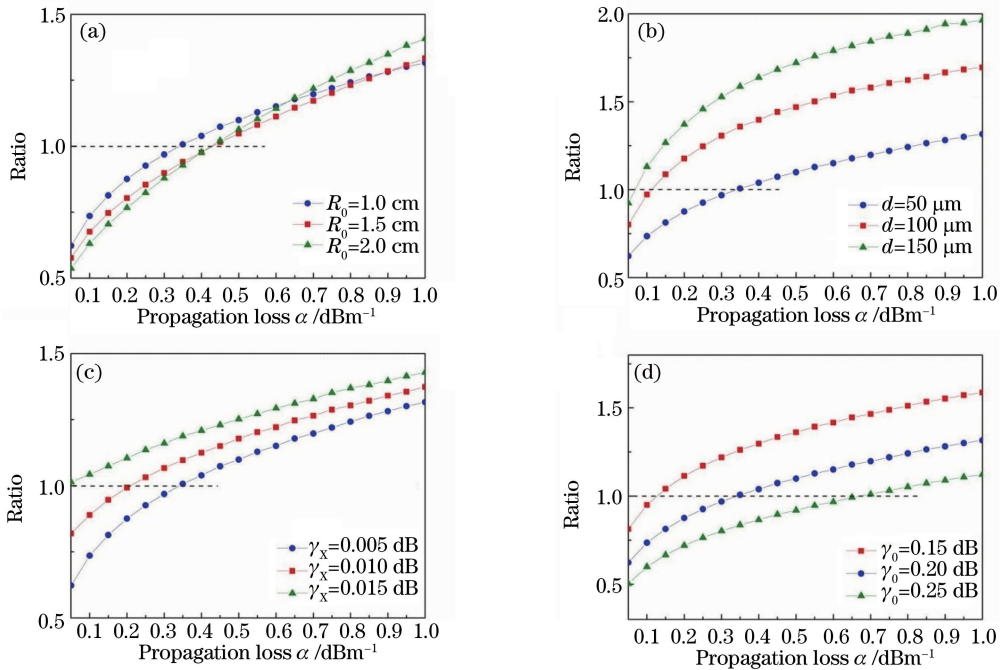


图 7 不同传输损耗下改变光波导参数再进行优化后的 IIOG 与 RIOG 的散粒噪声灵敏度的比值。(a) 仅改变 IIOG 螺旋环起始半径; (b) 仅改变 IIOG 螺旋环间距; (c) 仅改变 IIOG 的 X 交叉点损耗; (d) 仅改变 RIOG 的谐振环耦合器插入损耗

Fig. 7 Ratios of the optimal shot-noise-limited sensitivities of the IIOG and the RIOG after changing the waveguide parameters at different propagation losses. (a) Change the spiral start radius of the IIOG only; (b) change the spiral spacing of the IIOG only; (c) change the X-cross loss of the IIOG only; (d) change the insertion loss of the resonator coupler of the RIOG only

4 结 论

对于采用相同参数光路器件、相近的偏置调制方法以及相同面积和传输损耗的光波导萨尼亚克效应敏感环的 IIOG 和 RIOG,随着光波导传输损耗的降低,采用螺旋环光波导的 IIOG 的散粒噪声灵敏度要优于采用单圈谐振环光波导的 RIOG。随着超低损耗光波导技术的不断进步,IIOG 的散粒噪声灵敏度会得到显著提高,另外由于 IIOG 采用宽带光源,在非互易噪声抑制方面相比 RIOG 更具优势,因此采用超低损耗光波导萨尼亚克效应敏感环的 IIOG 在精度提高上具有较大潜力。

参 考 文 献

- 1 Wang Xiaoxiao, Feng Zhifang, Qin Yi, *et al.*. Study on the axial magnetic field sensitivity in optical fiber coil of fiber optic gyroscope[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(8): 0805005.
王夏霄, 冯志芳, 秦 祎, 等. 光纤陀螺光纤环轴向磁敏感性研究[J]. 中国激光, 2015, 42(8): 0805005.
- 2 Gao Yangyang, Zhou Weining, Lei Lili, *et al.*. Research on polarization characteristic of SLD start-up used in fiber optic gyroscope and its effect[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(11): 112302.
高洋洋, 周卫宁, 雷莉莉, 等. 光纤陀螺用超辐射发光二极管启动偏振特性及其影响研究[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(11): 112302.
- 3 Zhang Yonggang, Li Shuting, Gao Zhongxing, *et al.*. Evaluation of thermal drift error performance of fiber optic gyroscope[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(12): 122803.
张勇刚, 李淑婷, 郜中星, 等. 光纤陀螺螺旋漂移误差性能评价[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(12): 122803.
- 4 Wang Xiaoxiao, Qin Yi, Yu Jia, *et al.*. Study on geometrical axial magnetic field sensitivity in PM optical fiber coil of fiber optic gyroscope[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(12): 120601.

- 王夏霄, 秦 祎, 于 佳, 等. 光纤陀螺保偏光纤环几何轴向磁敏感性理论研究[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(12): 120601.
- 5 Sagnac G. L'éther lumineux démontré par l'effet du vent relatif d'éther dans un interféromètre en rotation uniforme[J]. C. R. Acad. Sci., 1913, 157: 708-710.
- 6 Mottier P, Pouteau P. Solid state optical gyrometer integrated on silicon[J]. Electronics Letters, 1997, 33(23): 1975-1977.
- 7 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.
- 8 Su Ni, Feng Lishuang, Lei Ming, *et al.*. Analysis of triangle wave modulation error in integrated optical resonance gyroscope[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(8): 0805002.
粟 妮, 冯丽爽, 雷 明, 等. 谐振式集成光学陀螺三角波调制误差分析[J]. 中国激光, 2012, 39(8): 0805002.
- 9 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.
- 10 Ma H L, Zhang J J, Wang L L, *et al.*. Double closed-loop resonant micro optic gyro using hybrid digital phase modulation[J]. Optics Express, 2015, 23(12): 15088-15097.
- 11 Mao H, Ma H L, Jin Z H, *et al.*. Polarization maintaining silica waveguide resonator optic gyro using double phase modulation technique[J]. Optics Express, 2011, 19(5): 4632-4643.
- 12 Bauters J F, Heck M J, John D D, *et al.*. Planar waveguides with less than 0.1 dB/m propagation loss fabricated with wafer bonding[J]. Optics Express, 2011, 19(24): 24090-24101.
- 13 Lee H, Chen T, Li J, *et al.*. Ultra-low-loss optical delay line on a silicon chip[J]. Nature Communications, 2012, 3: 867.
- 14 Srinivasan S, Moreira R, Blumenthal D, *et al.*. Design of integrated hybrid silicon waveguide optical gyroscope[J]. Optics Express, 2014, 22(21): 24988-24993.
- 15 Ma H, Wang S, Jin Z, *et al.*. Silica waveguide ring resonators with multi-turn structure[J]. Optics Communications, 2008, 281(9): 2509-2512.
- 16 Ciminelli C, Dell'Olio F, Armenise M N, *et al.*. High-Q spiral resonator for optical gyroscope applications: numerical and experimental investigation[J]. IEEE Photonics Journal, 2012, 4(4): 1844-1854.
- 17 Ma H, Wang S, Jin Z. Measurements of excess loss of the crossed waveguide using optical waveguide ring resonators[J]. Optics Communications, 2008, 281(24): 6016-6018.
- 18 Yu H Y, Zhang C X, Feng L S, *et al.*. SiO₂ waveguide resonator used in an integrated optical gyroscope[J]. Chinese Physics Letters, 2009, 26(5): 054210.