

激光与光电子学进展

应用于集成光学陀螺敏感单元的硅基微环谐振腔

孙道鑫¹, 张东亮^{1*}, 毕付¹, 鹿利单¹, 周哲海², 祝连庆¹

¹北京信息科技大学仪器科学与光电工程学院光电测试技术及仪器教育部重点实验室, 北京 100192;

²北京信息科技大学仪器科学与光电工程学院光纤传感与系统北京实验室, 北京 100016

摘要 硅基光子集成谐振腔作为光学敏感单元对芯片级光学陀螺的性能起着至关重要的作用。以互易敏感增强型双微环架构的光子集成陀螺谐振腔为研究对象, 通过时域有限差分法仿真分析了双微环谐振腔的关键结构参数, 并通过搭建仿真链路研究了微环谐振腔的品质因子、精细度与耦合系数、传输损耗的内在关系。在此基础上, 选取典型结构参数设计版图, 基于无源硅基光子集成工艺的多项目晶圆流片制备了双微环谐振腔器件。测试结果表明, 当微环半径为 500 μm 、波导与微环的耦合系数为 0.3 时, 在工作波长 1550 nm 附近微环的自由光谱范围为 0.182 nm, 3 dB 带宽为 0.045 nm, 精细度为 4.04, 品质因子约为 3.4×10^4 。本研究结果为双微环谐振腔的进一步优化设计提供了依据。

关键词 集成光学; 陀螺; 双微环谐振腔; 绝缘体上硅; 耦合系数; 品质因子

中图分类号 TN256

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.1313001

Application of Silicon-Based Microring Resonant Cavity in Integrated Optical Gyroscope Sensitive Unit

Sun Daoxin¹, Zhang Dongliang^{1*}, Bi Fu¹, Lu Lidan¹, Zhou Zhehai², Zhu Lianqing¹

¹Key Laboratory of the Ministry of Education for Optoelectronic Measurement Technology and Instrument, School of Instrument Science and Opto-Electronics Engineering, Beijing Information Science & Technology University, Beijing 100192, China;

²Beijing Laboratory of Optical Fiber Sensing and System, School of Instrument Science and Opto-Electronics Engineering, Beijing Information Science & Technology University, Beijing 100016, China

Abstract As an optically sensitive unit, the silicon-based integrated photonic resonator plays a vital role in the performance of chip-scale optical gyroscopes. In this paper, the integrated resonator of the photonic integrated gyroscope with the enhanced reciprocity-sensitive dual micro-ring architecture is the research object. The key structural parameters of the dual microring resonator are analyzed through finite-difference time-domain simulation. Constructing a simulation link allowed the study on the internal relationships between quality factor, fineness, coupling coefficient, and transmission loss. The resulting insights formed the basis for structural layout design. The dual microring resonant cavity device is then fabricated through a multiproject wafer tape-out using a passive silicon-based photonic integration process. Test results show that, for a microring radius of 500 μm , the coupling coefficient between waveguide and microring is 0.3, the working wavelength is around 1550 nm, the free spectral range is 0.182 nm, the 3 dB bandwidth is 0.045 nm, the fineness is 4.04, and the quality factor is $\sim 3.4 \times 10^4$. These research results provide a firm foundation for further design optimization of the dual microring resonator.

Key words integrated optics; gyroscope; dual microring resonator; silicon on insulators; coupling coefficient; quality factor

1 引言

光学陀螺是基于 Sagnac 效应测量运动载体旋转角速度的一种光学传感器, 可应用于海陆空各类运动

载体, 是惯性导航系统的重要组成部分, 也是姿态制导控制、定位定向的核心部件, 在国防和民用领域发挥着越来越大的作用^[1-2]。在信息化、智能化时代, 迫切需要微小型陀螺, 目前由分立器件组成的环形激光陀螺

收稿日期: 2021-07-23; 修回日期: 2021-08-24; 录用日期: 2021-08-27

基金项目: 北京市教委科技一般项目(KM202111232019)、高等学校学科创新引智计划(先进光电子器件与系统学科创新引智基地)(D17021)、集成光电子学国家重点实验室开放课题(IOSKL2020KF22)

通信作者: *zdl_photonics@bistu.edu.cn

和光纤陀螺的体积大、制造成本和功耗均较高,无法满足无人平台对小型化与低功耗的发展需求。集成光学陀螺是用波导谐振腔取代光纤环,利用集成光学工艺实现多功能光电器件的片上集成,可以减小陀螺的质量和尺寸,降低成本与功耗,更好地控制热效应和片上调制、探测,增加了系统的可靠性,具有重要的研究意义^[3-5]。

基于微环谐振腔构成的敏感单元是集成光学陀螺的重要组成部分,近年来,人们在谐振腔的材料平台和结构设计方面开展了很多研究^[6-8]。如:Ciminelli等^[9]提出了一种新的三环谐振腔结构,由三个半径和耦合比不同的谐振腔构成,其理论品质因子可达到 10^6 ;Feng等^[10]利用硅波导环形谐振腔改善集成光学陀螺的长期稳定漂移情况,仿真得到谐振腔的品质因子能达到 6.13×10^6 ;Khial等^[11]提出了一种具有互易灵敏度增强效果的双微环谐振腔结构,尺寸仅有 2 mm^2 ,品质因子可达到 10^5 ,验证了基于集成硅纳米光子学平台开发光学陀螺的可行性;Mohammadi等^[12]提出了光子晶体谐振腔结构,该结构由一个3 dB耦合器、两个总线波导和五个不同半径和折射率的环形谐振腔组成,提高了环形谐振腔与波导之间的耦合效率,品质因子为4326;Zhang等^[13]提出了一种跑道型微环谐振腔结构,理论品质因子高达 2.3×10^6 。已有的材料平台主要有绝缘体上硅(SOI)^[14-19]、铌酸锂(LiNbO_3)平台^[20]、聚合物材料平台^[21-22]、磷化铟(InP)平台^[23-24]、氮化硅(Si_3N_4)平台^[25]等。其中,硅基光子集成技术在设计与大规模工艺制造方面取得了巨大进步,SOI材料制作的集成光学器件表现出了良好性能,通过互补金属氧化物半导体(CMOS)兼容工艺可实现大批量低成本制造,相比其他材料平台在成本和集成度方面具有很大的优势。

本文以提升光学陀螺敏感单元的集成微环谐振腔品质因子为出发点,借鉴互异性敏感增强型集成光子陀螺的敏感单元双微环谐振腔^[8],理论分析了实现高品质因子的设计要素,通过优化波导截面及谐振腔的结构参数进行链路仿真分析,得到结构参数与品质因子、精细度的数学关系。选取典型结构参数,基于国内的无源硅光子集成芯片工艺平台设计版图并添加多项目晶圆(MPW)流片,然后对器件进行封装。最后,搭建测试系统,对测试结果进行分析讨论,为进一步优化基于双微环谐振的敏感单元性能提供思路和参考。

2 双微环谐振腔结构的设计与仿真

2.1 双微环结构的理论分析

谐振腔的结构如图1所示。该谐振腔由两个标准Add-drop形式的跑道型微环谐振腔组成,微环半径为 r ,耦合间距为 d ,耦合长度为 L ,两个微环尺寸相同,共享输入信号,两微环谐振腔的drop端口信号相互耦合,且在实际设计的微环波导上添加了热光调制器,能

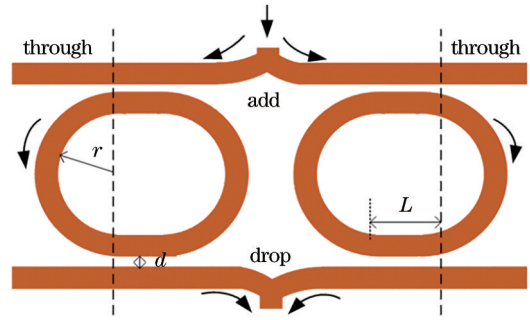


图1 基于SOI的双微环谐振腔结构

Fig. 1 Dual microring resonator structure based on SOI

调制输入波导和微环波导的折射率及光的相位,达到补偿工艺误差的目的。两束光在drop端口会聚后产生干涉信号,干涉信号的强度随微环转动角速度的变化而变化,通过检测干涉信号的强度变化可以获得转动角速度变化。对基于光波导谐振腔的光子陀螺而言,谐振腔的性能参数是影响陀螺性能的关键因素,因此,分析研究这些因素可为谐振腔的设计与优化提供理论指导。

双微环谐振腔的输出相位^[11]可表示为

$$\sigma_{\text{Sagnac}} \approx S \times \Delta\varphi_{\text{Sagnac}} = \frac{Q\lambda}{\pi n L_c} \Delta\varphi_{\text{Sagnac}}, \quad (1)$$

$$\Delta\varphi_{\text{Sagnac}} = \frac{8\pi n}{\lambda c} m A \Omega, \quad (2)$$

式中: Q 为环形谐振腔的品质因子,表征谐振腔内的光子寿命; L_c 为微环的周长, S 为光在离开微环前绕环传播的有效次数, n 为波导的有效折射率, λ 为波长, $\Delta\varphi_{\text{Sagnac}}$ 为Sagnac的相位差, A 为封闭路径的面积, m 为匝数, Ω 为角速度, c 为光速。可以发现,该结构中谐振腔的相位响应放大了给定Sagnac相移时观测的相位差,从而提升了检测的灵敏度。 Q 值越高,表明陀螺的灵敏度越高;耦合参数的微环谐振腔半径越大, Q 值越高,但这与陀螺器件的小型化发展需求相悖,因此,优化提高双微环结构的 Q 值对提升陀螺灵敏度具有重要意义。

2.2 微环谐振腔的基本参数及其对陀螺性能的影响

谐振腔的品质因子^[26-27]可表示为

$$Q = 2\pi f \frac{U}{P} = -2\pi f \frac{U}{dU/dt} = 2\pi f \tau, \quad (3)$$

式中, U 为腔内的总能量, $P = dU/dt$ 为腔内光能量的损耗速度, f 为谐振光波的频率, τ 为光能量在腔内的衰荡时间。谐振腔的品质因子也可以表示为

$$Q = \lambda_0 / X_{\text{FWHM}}, \quad (4)$$

式中, λ_0 为谐振波长, X_{FWHM} 为谐振腔的半峰全宽(FWHM),即幅值降低3 dB对应的频率范围(谐振腔drop端FWHM处的波长范围),可表示为

$$X_{\text{FWHM}} = \frac{c}{\pi L_c n} \cdot \frac{k^2}{\sqrt{1 - k^2}}, \quad (5)$$

式中, k 为耦合器的耦合系数。可以发现, FWHM 与耦合系数 k 成正比, 与谐振腔的腔长 L_c 成反比。微环谐振腔传输时存在各种损耗, 这些损耗决定着微环腔内光能量的寿命, 因此, 微环谐振腔的品质因子还可以表示为

$$\frac{1}{Q} = \frac{1}{Q_{\text{couple}}} + \frac{1}{Q_{\text{bend}}} + \frac{1}{Q_{\text{abs}}} + \frac{1}{Q_{\text{sca}}}, \quad (6)$$

式中, Q_{couple} 为直波导和环形波导的耦合损耗, Q_{bend} 为波导弯曲带来的损耗, Q_{abs} 为介质材料对光波的吸收损耗, Q_{sca} 为材料不均匀和波导粗糙度导致的光散射损耗。对于波导微环谐振腔, 品质因子取决于谐振腔的腔长、波导耦合间距、耦合长度、透射系数、波导宽度等结构参数。因此, 可通过选取合适的结构并优化其参数来提高谐振腔的品质因子, 进而为提高陀螺的性能奠定基础。

精细度也是评价微环谐振腔性能的重要参数, 能反映谐振腔对光频率的敏感程度^[27], 可表示为

$$F = X_{\text{FSR}} / X_{\text{FWHM}} = X_{\text{FSR}} Q / \lambda_0 = \frac{\pi}{2 \cdot \arcsin \left[\frac{1 - \exp(-\alpha)(1-k)}{2 \sqrt{\exp(-\alpha)(1-k)}} \right]}, \quad (7)$$

式中: α 为传输损耗系数; X_{FSR} 为自由光谱范围 (单位为 m), 定义为两个相邻谐振波长的间隔。可以发现,

精细度与耦合系数 k 和传输损耗等因素相关。

2.3 波导的设计

当波导高度为定值时, 随着波导宽度的增加, 模式数也逐渐增加, 在 1550 nm 波长下, 满足 SOI 矩形波导单模条件的经验公式^[28]可表示为

$$0.2 + 162 \exp(-H/0.03) \leq W \leq 0.3 + 5.9 \exp(-H/0.08), \quad (8)$$

式中, W 和 H 分别为条形波导的宽度和高度, 单位为 μm 。通过 Lumerical 软件的 MODE 模块仿真高度为 0.22 μm 、不同宽度波导的模式分布, 结果如图 2 所示。计算结果表明, 0.22 μm 高的条形波导对应单模传输的宽度在 0.4~0.7 μm 范围内。即: 当波导宽度 W 为 0.4 μm 时, 模场出现了比较明显的泄漏, 损耗较大; 当波导宽度 W 为 0.5 μm 和 0.6 μm 时, 波导为单模传输, 损耗很小; 当波导宽度 W 大于 0.7 μm 时, 产生了 TE_0 模和 TE_1 模。因此, 本方案设计的硅基矩形直波导宽度为 0.5 μm 。为提高谐振腔的响应和 Q 值, 选取微环的直径为 500 μm 。为了减少光在微环中受到侧壁粗糙散射引起的传输损耗和反射的影响, 选取微环的宽度 W_r 为 1.2 μm , 经过 Taper 渐变波导过渡到 0.5 μm 宽的单模耦合直波导, 此时高阶模式被抑制, 传输损耗会大大降低, 从而在保证低损耗的同时使输出模式仍然为单模。

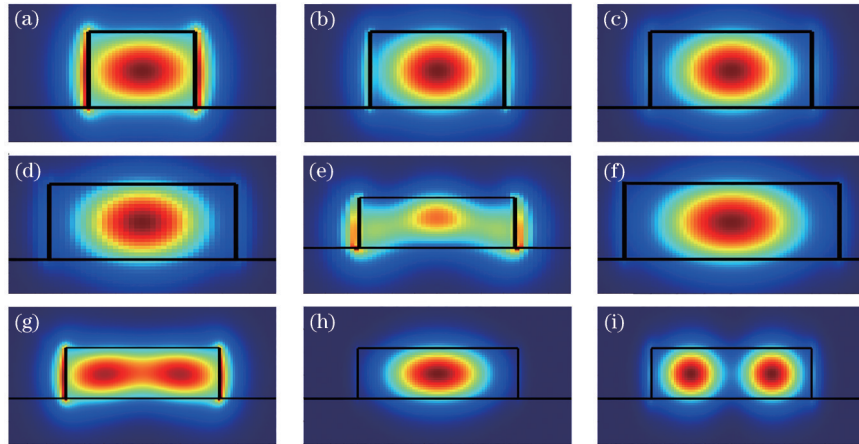


图 2 不同宽度波导的光场分布。(a) $W=0.4 \mu\text{m}$, TE_0 ; (b) $W=0.5 \mu\text{m}$, TE_0 ; (c) $W=0.6 \mu\text{m}$, TE_0 ; (d) $W=0.7 \mu\text{m}$, TE_0 ; (e) $W=0.7 \mu\text{m}$, TE_1 ; (f) $W=0.8 \mu\text{m}$, TE_0 ; (g) $W=0.8 \mu\text{m}$, TE_1 ; (h) $W=1.2 \mu\text{m}$, TE_0 ; (i) $W=1.2 \mu\text{m}$, TE_1

Fig. 2 Light field distribution of waveguides of different widths. (a) $W=0.4 \mu\text{m}$, TE_0 ; (b) $W=0.5 \mu\text{m}$, TE_0 ; (c) $W=0.6 \mu\text{m}$, TE_0 ; (d) $W=0.7 \mu\text{m}$, TE_0 ; (e) $W=0.7 \mu\text{m}$, TE_1 ; (f) $W=0.8 \mu\text{m}$, TE_0 ; (g) $W=0.8 \mu\text{m}$, TE_1 ; (h) $W=1.2 \mu\text{m}$, TE_0 ; (i) $W=1.2 \mu\text{m}$, TE_1

当光在直波导传输过程中需要改变路径时, 选择合适的弯曲半径是有效降低损耗的一种途径。用 Lumerical 软件的 MODE 模块对高为 0.22 μm 、宽为 0.5 μm 的波导在不同弯曲半径下的传输损耗进行仿真。结果表明, 当弯曲半径大于 5 μm 时, 可以忽略损耗。因此, 本方案中耦合区域的弯曲半径均取为 5 μm 。

2.4 耦合间距、耦合长度的设计

按照 MPW 流片的工艺规则, 设计固定波导耦合

间距 d 为 0.2 μm , 仿真的耦合结构如图 3 所示。其中, 输入波长为 1550 nm, 波导高度 H 为 0.22 μm 、宽度 W 为 0.5 μm 、弯曲半径 r 为 5 μm , 保持波导间耦合间距 d 为 0.2 μm 不变, 改变耦合长度 L , 其取值范围为 1~35 μm 。

仿真得到耦合系数与耦合长度的关系为

$$k^2 = P_{\text{drop}} / P_{\text{in}}, \quad (9)$$

$$t^2 = P_{\text{through}} / P_{\text{in}}, \quad (10)$$

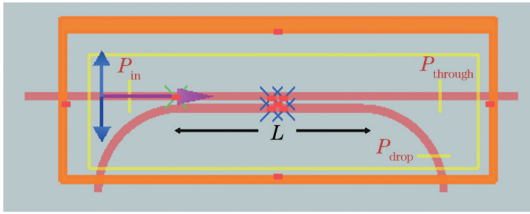


图 3 耦合结构的仿真图

Fig. 3 Simulation diagram of the coupled structure

式中, k, t 分别为耦合系数、透射系数, $P_{in}, P_{drop}, P_{through}$ 分别为输入光功率、drop 端输出功率、直通端输出功率。根据式(9)、式(10)计算仿真的耦合系数、透射系数与耦合长度的关系如图 4 所示。可以发现, 随着耦合长度的增加, 耦合系数 k 逐渐增加, 透射系数 t 则逐渐减小, 但 $k^2 + t^2$ 始终为 1。该结论为根据双微环结构对耦合系数的需要确定耦合长度提供了理论依据。

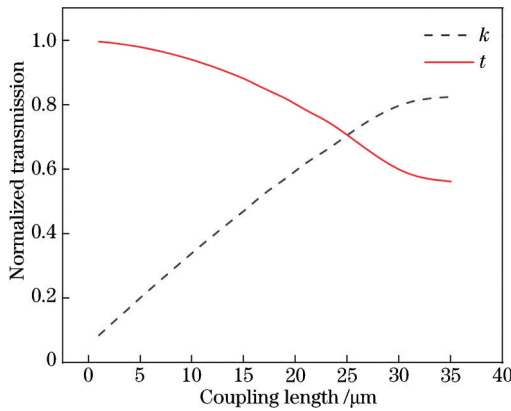


图 4 耦合系数、透射系数与耦合长度的关系

Fig. 4 Relationship between coupling coefficient, transmission coefficient and coupling length

2.5 双微环谐振腔的整体结构设计及仿真

通过 Lumerical 软件的 Interconnect 模块构建图 1 中的双微环谐振腔结构并对传输光谱特性进行仿真分析。设置波导的有效折射率为 2.489, 微环半径为 $500 \mu\text{m}$, 模式为 TE_0 模式, 仿真结果如图 5 所示。其中, 光网络分析仪 (ONA) 输出的光经过耦合器 C_1 分成两路, 分别经过直波导 WGD_1、WGD_3 与 RING_1、RING_2 两微环谐振腔相连。

改变微环谐振腔的耦合系数 k , 使其分别为 0.07、0.09、0.15、0.20、0.25、0.30, 仿真结果通过 ONA 输出后进行分析, 得到波长 1550 nm 附近的传输曲线如图 6 所示。可以发现: 随着 k 的增加, 3 dB 带宽变大; k 越小, 谐振峰谷越尖锐, 精细度 F 就越大, 但当 k 减小到 0 时, 没有光进入腔内, 也没有谐振特性出现, 这表明耦合系数是影响谐振腔性能的一个重要因素。

对图 5 中的参数进行设置, 通过改变耦合系数、传输损耗计算 3 dB 带宽, 结合式(4)计算出对应传输光谱的 Q 值, 结果如图 7 所示。可以发现: 固定损耗下, Q 值随耦合系数 k 的减小逐渐增大, 但考虑到探测器灵敏度, k 值不可能一直减小, 否则 drop 端光功率太小会导致探测器无法有效分辨; 相同 k 值下, Q 值随损耗的减小而增大, 因此降低波导损耗是提升 Q 值的关键。

受现有工艺水平的限制, 当前 MPW 流片中传输损耗为固定值 2 dB/cm: 当损耗为 2 dB/cm, 耦合系数 k 为 0.3 时, Q 值可达 7.75×10^4 ; 当耦合系数 k 为 0.2 时, Q 值可达 1.10739×10^5 , 谐振腔的系统传输特性如图 8 所示。可以发现, 在波长 1550 nm 附近, FSR 为 0.16 nm, 3 dB 带宽为 0.01399 nm, 通过式(7)计算得到精细度 F 为 11.4367。

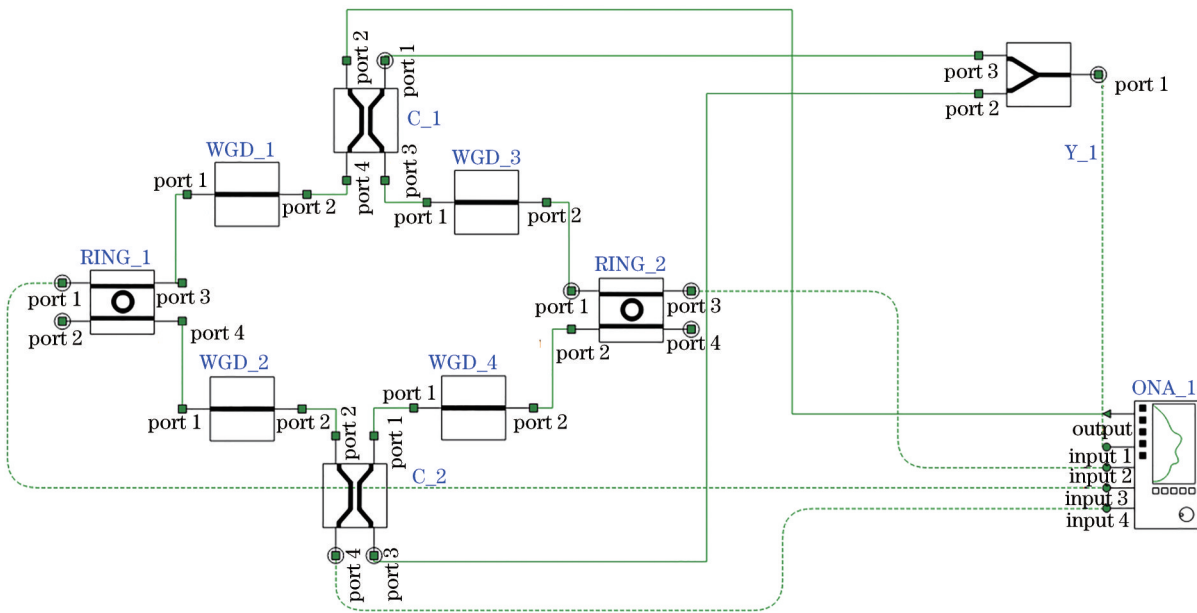


图 5 双微环链路的仿真图

Fig. 5 Simulation diagram of dual microring link

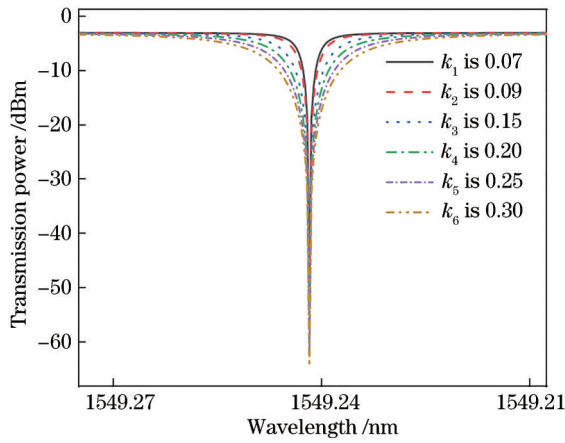


图 6 谐振谱与耦合系数的关系

Fig. 6 Relationship between resonance spectrum and coupling coefficient

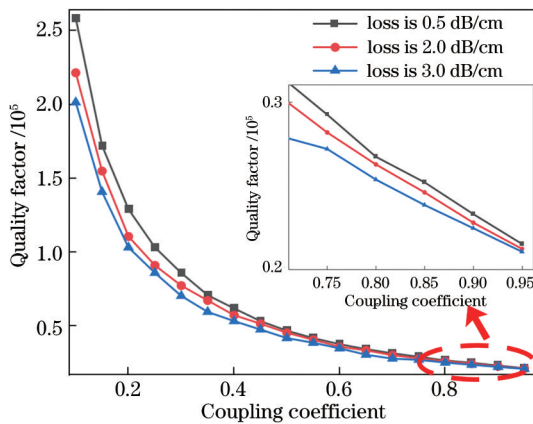


图 7 不同传输损耗下品质因子与耦合系数的关系

Fig. 7 Relationship between quality factor and coupling coefficient under different transmission loss

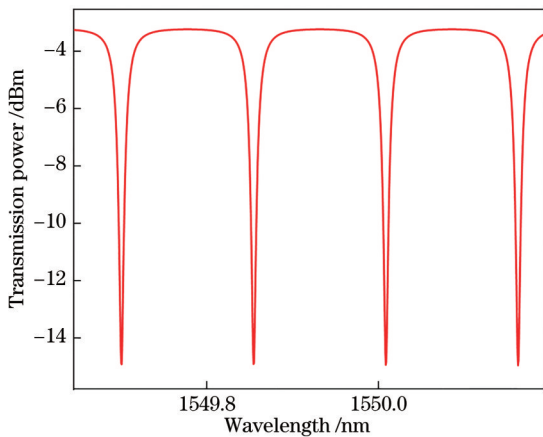


图 8 波长 1550 nm 附近光谱

Fig. 8 Spectral wavelength near 1550 nm

微环波导的单位长度传输损耗分别为 0.5、2.0、3.0 dB/cm 时对应谐振腔的传输谱如图 9 所示。可以发现,传输损耗越小,谐振峰谷越尖锐, F 值越大。

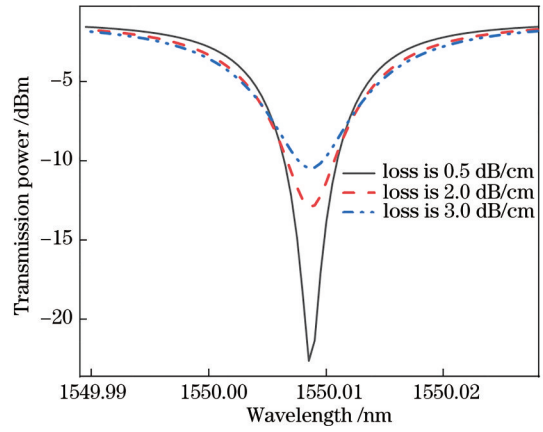


图 9 传输损耗不同时谐振腔的谐振曲线

Fig. 9 Resonance curve of resonator with different transmission loss

2.6 片上结构的设计

根据仿真结果,选取了典型的结构参数对器件设计进行加工验证,双微环的结构参数如表 1 所示。其中,耦合系数 k 为 0.3,对应的耦合长度 L 为 10 μm 。

表 1 微环谐振腔的结构参数

Table 1 Structural parameters of the microring resonator

Parameter	Value	Parameter	Value
$W / \mu\text{m}$	0.5	$W_r / \mu\text{m}$	1.2
$H / \mu\text{m}$	0.22	$r / \mu\text{m}$	500
$d / \mu\text{m}$	0.2	$L_c / \mu\text{m}$	3360
$L / \mu\text{m}$	10	Transmission loss / $(\text{dB} \cdot \text{cm}^{-1})$	2

图 10 为加工完成的芯片显微照片。其中:A 为波导与微环耦合区域;B 为耦合光栅,用于测试传输光谱;C 为分束器,可实现波导中光的分束和合束。

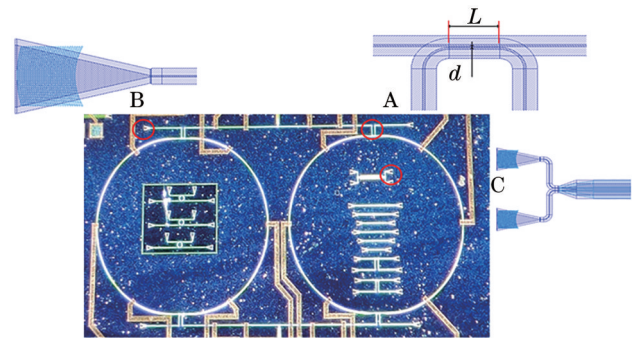


图 10 双微环谐振腔芯片结构实物图与关键器件版图

Fig. 10 Picture of the dual microring resonator chip and layout of key devices

图 11 为芯片封装后的测试模块,通过阵列光纤与波导光栅耦合引出多组光路形成光纤阵列,便于对器件的测试。

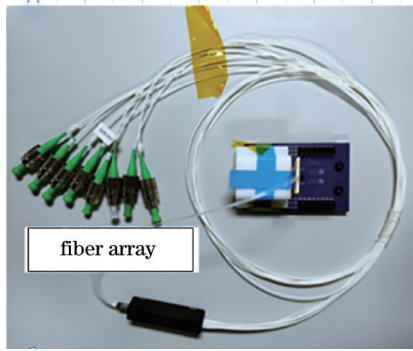


图 11 芯片测试模块
Fig. 11 Chip test module

3 微环的性能测试分析与讨论

通过波导耦合测试平台完成了陀螺敏感单元中关

键器件性能的测试。波导耦合系统的主要作用是调节光纤位置实现连接光纤和光波导的高效耦合,最终完成集成波导器件光学性能的测试工作。使用的耦合测试平台如图 12 所示,主要包括光源、偏振控制器、垂直耦合对准平台、分束器、光功率计和光谱仪。使用宽谱光源(1525~1610 nm)获得微环谐振腔的传输谱,大致确定谐振峰的位置后用可调谐激光器(1500~1630 nm)在谐振峰位置精确扫描,得到更精确的谐振曲线图。测量设备主要有横河光谱仪(AQ6370D, 600~1700 nm,分辨率为 0.02 nm)、光功率计(可测光功率范围为-85~5 dBm)。首先,将芯片固定在样品架的合适位置,通过六轴调节架调节输入/输出光纤头相对于芯片上耦合光栅的位置;然后,根据光功率计的示数实时调节输入/输出耦合光纤头的位置,使光功率计的示数最大,此时光纤-波导光栅处于最佳耦合位置。

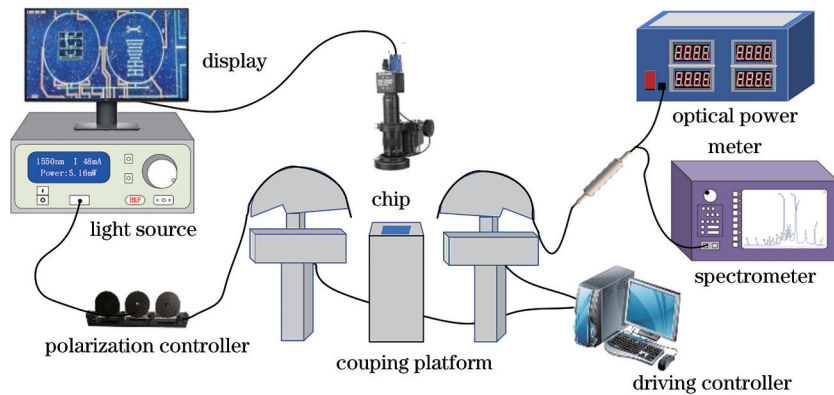


图 12 波导耦合测试平台示意图
Fig. 12 Schematic diagram of the waveguide coupling test platform

为测试硅基集成分束器的性能,在输入端通光后分别测试两个输出端口的光功率。对这些测试数据进行拟合,计算出波长 1550 nm 处分束器的分光比为 49:51,数据拟合结果如图 13 所示。

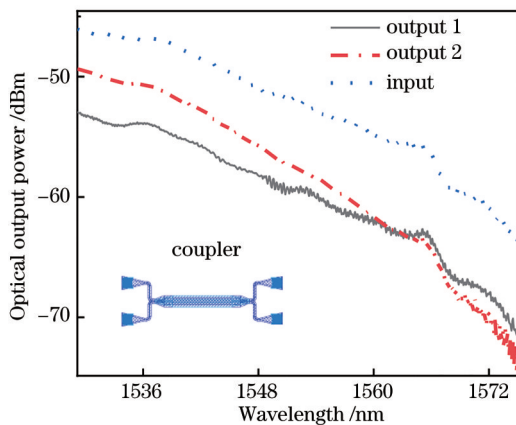


图 13 分束器的分光比测试
Fig. 13 Spectral ratio test fitting of the beam splitter

光纤和光波导的耦合采用的是垂直光栅耦合器,损耗谱测试结果如图 14 所示。可以发现,在 1536~

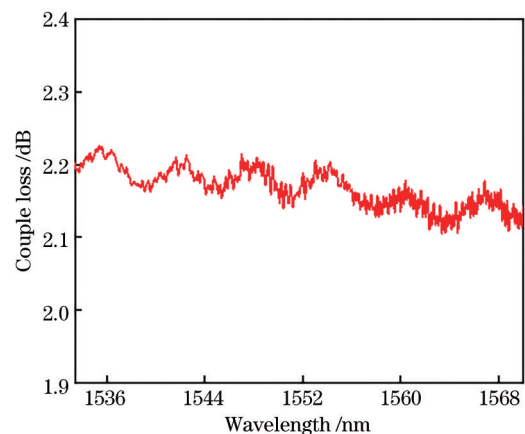


图 14 光栅耦合结构的损耗
Fig. 14 Loss of the grating coupling structure

1570 nm 波长范围内的耦合损耗小于 2.250 dB,在工作波长 1550 nm 处的耦合损耗约为 2.157 dB。此外,在对准情况相同的条件下认为输入端和输出端的光栅耦合损耗是一致的。

图 15 为测试得到的双微环谐振腔耦合后 drop 端的传输光谱,其中, Q 值和 F 值都是衡量谐振腔性能的

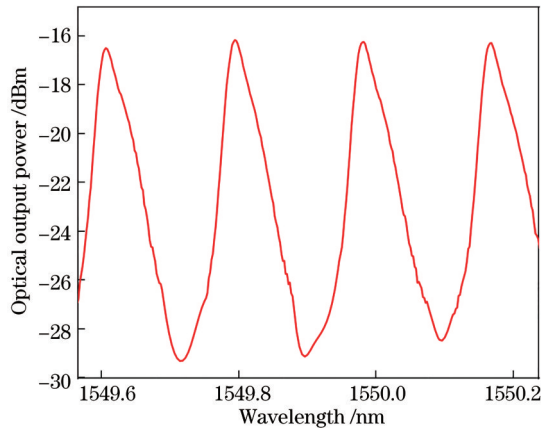


图 15 双微环谐振腔的测试光谱图

Fig. 15 Test spectrogram of dual microring resonator

重要因素,且均与 3 dB 带宽相关。测试结果表明,在波长 1550 nm 处,双微环谐振腔的 FSR 为 0.182 nm,3 dB 带宽约为 0.045 nm, F 值为 4.04, Q 值为 3.4×10^4 。

表 2 为测试结果与仿真结果。对比发现,测试值中的 3 dB 带宽偏大,原因是测试链路的耦合损耗较大,在仿真链路上没有直接体现。此外,受测试光谱仪分辨率(0.02 nm)的限制,实验测试数据存在误差,不能反映器件的真实带宽。

表 2 测试结果与仿真结果

Table 2 Test results and simulation results

Category	k	FSR / nm	FWHM (3 dB) /nm	F	$Q / 10^4$
Simulation	0.3	0.155	0.020	7.75	7.75
Experimentation	0.3	0.182	0.045	4.04	3.40

4 结 论

对双微环谐振腔结构进行了设计仿真优化并加工出芯片。仿真结果表明,微环的宽度过小会导致辐射损耗增大,在满足单模条件下增大微环宽度会减小辐射损耗以及表面粗糙引起的散射损耗。仿真分析了耦合系数和传输损耗对 Q 值和 F 值的影响,结果表明,随着耦合系数、损耗的减小, Q 值逐步增大,有利于提高信号的检测精度,进而提高陀螺的灵敏度。选取典型结构参数设计了器件的无源硅基光子 MPW 流片版图,其中,直波导的宽度为 500 nm,微环波导宽度为 1.2 μm 、微环半径为 500 μm 、耦合波导弯曲半径为 5 μm 、耦合长度为 10 μm 。对芯片的测试结果表明,分束器的分光比为 49:51,光栅耦合器的耦合损耗为 2.157 dB,波导与微环的耦合系数为 0.3 时,测得波长 1550 nm 处双微环谐振腔的 FSR 为 0.182,3 dB 带宽约为 0.045 nm,品质因子的测试值为 3.4×10^4 。受流片成本的限制,没有进行多组流片结构的对比实验,后续研究将主要针对高 Q 值设计进行验证和多组结构的测试对比,同时将硅基

调制器、探测器与微环集成,为后续集成陀螺的优化设计提供了一定的指导意义。

参 考 文 献

- [1] 张桂才. 光纤陀螺原理与技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008.
Zhang G C. The principles and technologies of fiber-optic gyroscope[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2008.
- [2] 章燕申, 张春熹, 蒋军彪. 光电子学与光学陀螺仪[M]. 北京: 清华大学出版社, 2017.
Zhang Y S, Zhang C X, Jiang J B. Optoelectronics and optical gyroscopes[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2017.
- [3] 刘丹妮, 青晨, 李慧, 等. 干涉式集成光学陀螺的发展现状与趋势[C]// 第四届全国自主导航学术会议 (CCAN 2020)——光子晶体光纤陀螺及相关器件的技术与应用论文集. 北京: 中国惯性技术学会, 2020.
Liu D N, Qing C, Li H, et al. Development status and trend of interferometric integrated optical gyroscope[C]// The 4th National Autonomous Navigation Academic Conference (CCAN 2020): Technology and application of photonic crystal fiber gyroscope and related devices. Beijing: Chinese Society of Inertial Technology, 2020.
- [4] 冯雨爽, 王潇, 刘丹妮, 等. 谐振式集成光学陀螺的一些近期发展情况[C]// 2016 年光学陀螺及系统技术发展与应用研讨会论文集. 北京: 中国惯性技术学会, 2016.
Feng L S, Wang X, Liu D N, et al. Some recent developments of resonant integrated optical gyroscope [C]// Proceedings of 2016 Symposium on Development and Application of Optical Gyroscope and System Technology. Beijing: Chinese Society of Inertial Technology, 2016.
- [5] (美)罗伯特 G. 亨斯珀格. 集成光学理论与技术[M]. 叶玉堂, 译. 北京: 电子工业出版社, 2012.
Hunsperger R G. Integrated optics theory and technology [M]. Ye Y T, Transl. Beijing: Electronic Industry Press, 2012.
- [6] 刘志敏, 张镇斌, 张箫, 等. 基于环形谐振器边耦合波导的多模光学滤波器[J]. 光学学报, 2020, 40(11): 1123001.
Liu Z M, Zhang Z B, Zhang X, et al. Multimode optical filter based on waveguide side-coupled ring resonator[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(11): 1123001.
- [7] 雷明, 方圆, 于怀勇, 等. 基于空心光子晶体光纤谐振腔的激光器频率调谐系数测试[J]. 中国激光, 2020, 47(3): 0301009.
Lei M, Fang Y, Yu H Y, et al. Frequency tuning ratio testing of lasers based on hollow photonic crystal fiber resonator[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(3): 0301009.
- [8] 王吉, 陈迪俊, 魏芳, 等. 基于全光纤环形谐振腔的转移腔稳频技术研究[J]. 中国激光, 2020, 47(9): 0906005.
Wang J, Chen D J, Wei F, et al. Research on frequency stabilization technology of transfer cavity based on all-fiber ring resonator[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(9): 0906005.

- [9] Ciminelli C, Campanella C E, Dell'Olio F, et al. Theoretical investigation on the scale factor of a triple ring cavity to be used in frequency sensitive resonant gyroscopes[J]. *Journal of the European Optical Society: Rapid Publications*, 2013, 8: 13050.
- [10] Feng L S, Wang J J, Zhi Y Z, et al. Transmissive resonator optic gyro based on silica waveguide ring resonator[J]. *Optics Express*, 2014, 22(22): 27565-27575.
- [11] Khial P P, White A D, Hajimiri A. Nanophotonic optical gyroscope with reciprocal sensitivity enhancement[J]. *Nature Photonics*, 2018, 12(11): 671-675.
- [12] Mohammadi M, Olyae S, Seifouri M. Passive integrated optical gyroscope based on photonic crystal ring resonator for angular velocity sensing[J]. *Silicon*, 2019, 11(6): 2531-2538.
- [13] Zhang L, Jie L L, Zhang M, et al. Ultrahigh-Q silicon racetrack resonators[J]. *Photonics Research*, 2020, 8(5): 684-689.
- [14] Bogaerts W, Chrostowski L. Silicon photonics circuit design: methods, tools and challenges[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2018, 12(4): 1700237.
- [15] Dai D X. Advanced passive silicon photonic devices with asymmetric waveguide structures[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2018, 106(12): 2117-2143.
- [16] Lim A E J, Song J F, Fang Q, et al. Review of silicon photonics foundry efforts[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2014, 20(4): 405-416.
- [17] Talebifard S, Schmidt S, Shi W, et al. Optimized sensitivity of silicon-on-insulator (SOI) strip waveguide resonator sensor[J]. *Biomedical Optics Express*, 2017, 8(2): 500-511.
- [18] Mishra S, Bhanja U, Mishra G P. Variation of source gate workfunction on the performance of dual material gate rectangular recessed channel SOI-MOSFET[J]. *International Journal of Numerical Modelling: Electronic Networks, Devices and Fields*, 2019, 32(1): e2487.
- [19] Liao W G, Wei W, Tong Y, et al. pH sensing and low-frequency noise characteristics of low temperature (400 °C) p-channel SOI Schottky ISFETs[J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2017, 38(8): 1146-1149.
- [20] Wang C, Zhang M, Chen X, et al. Integrated lithium niobate electro-optic modulators operating at CMOS-compatible voltages[J]. *Nature*, 2018, 562(7725): 101-104.
- [21] 唐杰. 谐振式聚合物集成光学陀螺的基础研究[D]. 南京: 东南大学, 2019.
- Tang J. Research on polymer resonant integrated optic gyroscope[D]. Nanjing: Southeast University, 2019.
- [22] 钱广. 基于聚合物光波导的谐振腔光子器件研究[D]. 南京: 东南大学, 2017.
- Qian G. Study of photonic resonators based on polymer waveguide[D]. Nanjing: Southeast University, 2017.
- [23] Smit M, Leijtens X, Ambrosius H, et al. An introduction to InP-based generic integration technology [J]. *Semiconductor Science and Technology*, 2014, 29(8): 083001.
- [24] Ciminelli C, Dell'Olio F, Armenise M N, et al. High performance InP ring resonator for new generation monolithically integrated optical gyroscopes[J]. *Optics Express*, 2013, 21(1): 556-564.
- [25] 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.
- [26] Bogaerts W, de Heyn P, van Vaerenbergh T, et al. Silicon microring resonators[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2012, 6(1): 47-73.
- [27] 钱坤. 面向谐振式微光学陀螺的高 Q 平面光波导谐振腔研究[D]. 太原: 中北大学, 2017.
- Qian K. Research on the high Q planar lightwave circuit resonator for resonant micro-optic gyroscope[D]. Taiyuan: North University of China, 2017.
- [28] Lim S T, Png C E, Ong E A, et al. Single mode, polarization-independent submicron silicon waveguides based on geometrical adjustments[J]. *Optics Express*, 2007, 15(18): 11061-11072.