

激光与光电子学进展

集成光学陀螺敏感单元的最新进展

毕付^{1,2}, 张东亮^{1,2*}, 鹿利单^{1,2}, 祝连庆^{1,2**}

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 集成光子技术引领了小型化光学器件的发展,可以在单块芯片上实现非常复杂的功能。许多集成光学器件,如分光器、谐振器、激光器、放大器、滤波器 and 调制器等均已实现单片集成或者混合集成,各国在设计、制造复杂的光子集成器件投入了大量的研究工作。通过集成光学技术制造的光学陀螺仪可以有效减小陀螺仪的重量和尺寸,降低成本和功耗,并增加系统的可靠性,性能指标也逐渐提升,具有良好的发展潜力。本文介绍了国内外集成光学陀螺仪敏感单元的研究状况,简要分析了当前通过采用不同材料平台和新型谐振结构设计提升集成光学陀螺仪性能的研究特点,期望有助于该领域的研究人员对集成光学陀螺技术的最近进展有比较全面的了解。

关键词 集成光学; 陀螺; 谐振腔; 惯性器件

中图分类号 TN252

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.0700005

Latest Progress of Integrated Optical Gyroscopes Sensitive Unit

Bi Fu^{1,2}, Zhang Dongliang^{1,2*}, Lu Lidan^{1,2}, Zhu Lianqing^{1,2**}

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 The photonic integrated circuit (PIC) has led to the development of miniaturized optical devices that can achieve very complex functions on a single chip. Many integrated optical devices, such as beam splitters, resonators, lasers, amplifiers, filters, and modulators, have achieved monolithic integration or hybrid integration. Countries have invested a lot in designing and manufacturing complex PICs research work. The optical gyroscope manufactured by integrated optical technology can effectively reduce the weight and size of the gyroscope, reduce the cost and power consumption, and increase the reliability of the system. The performance index is also gradually improved, and it has good development potential. This article introduces the research status of integrated optical gyroscopes at home and abroad, and briefly analyzes the current research characteristics of improving the performance of integrated optical gyroscopes by using different material platforms and new resonant structure designs.

Key words integrated optics; gyroscope; resonant cavity; inertial device

OCIS codes 130.2790; 060.2800; 130.3120

收稿日期: 2020-06-22; 修回日期: 2020-07-28; 录用日期: 2020-08-06

*E-mail: zdl_photonics@bistu.edu.cn; **E-mail: zhulianqing@sina.com

1 引言

惯性导航系统以其完全自助式导航、高度隐蔽性的优点,在武器装备、空间飞行器、海洋勘探、汽车导航、机器人控制、手机定位定向等领域有着广泛的应用。高精度、高可靠性、重量轻、小型化是惯性导航系统追求的主要目标。惯导系统中陀螺仪的精度影响着系统性能,成为各国研发的重点之一。

光纤陀螺以及激光陀螺在高精度惯性导航方面有广泛的应用基础,但在小型化、低功耗、轻质量应用场合都受到不同程度的制约。借助集成光子学技术的发展,集成光学陀螺仪在激光陀螺以及光纤陀螺的发展基础上,向更高精度、更小尺寸以及更高集成度方向发展。集成光学陀螺仪的敏感单元是以波导取代光纤,利用单片集成或者混合集成工艺将光源、调制器、分束器、探测器等有源/无源器件中的部分或全部集成在一块芯片上,甚至通过先进系统级封装集成工艺将光学敏感芯片与信号处理电路芯片异构集成,实现微系统化。同时,集成光学技术对电磁干扰不敏感,受振动影响小,在恶劣环境下也能够使用,成为新一代光学陀螺的研究热点^[1]。

谐振式光学陀螺通过检测由 Sagnac 效应引起的腔内相向传输光束的谐振频率差实现旋转角速度的测量,谐振式集成光学陀螺系统的关键是以集成微型光学谐振腔为核心构成的敏感单元,集成光学谐振腔的设计与制造是提升集成光学陀螺仪性能的主要研究内容^[2]。谐振腔品质因子 Q 值和光波导的光传输损耗有直接的关系,人们一直致力于高 Q 值、低损耗波导集成技术研究。近年来,在谐振腔的结构创新设计和新型集成材料的应用方面开展了很多研究,致力于提升光学敏感单元性能。下面将从集成材料平台和新型结构设计两个方面分析当前的技术进展。

2 集成光学陀螺的材料平台

谐振式集成光学陀螺仪中的关键部分之一是微环谐振腔,微环谐振腔使用的材料以及不同的结构形式对陀螺仪的性能有着很大的影响。为了降低损耗或者提高集成度,国内外多家研究机构对不同材料上的微环谐振腔进行了研究^[3-5]。并报道了采用二氧化硅^[6]、玻璃^[7-8]、聚合物^[9]、铌酸锂

(LiNbO₃)^[10]、Ⅲ-V 族化合物半导体^[11]等材料制作光波导结构的研究成果,展现出了各自的优缺点。

基于硅基 SiO₂、Si₃N₄ 材料的光波导对 1550 nm 波长附近的光拥有超低的吸收损耗,主要是无源波导器件,不能单片集成有源类型的器件;LiNbO₃ 晶体具有优异的电光和声光特性,是大多数集成光电器件的理想材料,LiNbO₃ 光波导通常被用于光通信系统中的电光调制器、光开关、环形振荡器等,但是不能单片集成探测、光源等有源类型的器件;其中,基于绝缘底上硅(SOI)的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的进步^[12],与 CMOS 工艺兼容性较高,可实现除光源之外的单片集成,硅基异质异构集成光源也逐步取得重要进展;此外,InP 基的光子集成可实现有源与无源器件的单片集成,但工艺较为复杂,成本较高,也具有重要地位和前景。有机聚合物由于易于制造、成本低,也是备受关注的集成光学陀螺的材料。下面主要对这三种光子集成平台进行简要介绍。

2.1 硅基集成光学平台

目前硅材料在集成光子领域应用广泛,一方面优势体现在单晶硅对于 1.3~1.6 μm 通信波长的光具有较低的吸收损耗;另一方面优势,基于硅材料的微加工工艺是目前半导体材料中最为成熟的,而且硅基光波导的加工与 CMOS 技术具有良好的兼容性,为低成本、光电集成器件提供了技术保证^[13-14]。同时,芯层硅和二氧化硅包层之间的高折射率差,使得超高品质因数和紧凑尺寸光学器件成为可能。

硅基光子集成技术旨在通过与 CMOS 工艺兼容的半导体技术实现有源与无源光子器件的集成,甚至是光子器件与电子器件集成,在光通信、光传感、光计算及微波光子学等领域具有重大应用前景。图 1 为集成硅光子平台的横截面示意图,其中的关键器件有硅波导、耦合光栅、Ge 探测器以及调制器等。

基于 SOI 光波导硅材料(折射率 $n=3.47$)与绝缘层氧化硅材料(折射率 $n=1.45$)形成高折射率差,将光限制在顶层单晶硅中传播。除此之外,在硅材料上引入掺杂工艺和异质锗材料外延工艺,可以实现硅基电光调制器和探测器的集成,同时随着 Ⅲ-V 族半导体光源与硅的键合集成、硅上直接外延工艺的突破,硅基集成单片激光器也有望实现^[15]。

综合上述情况,基于 SOI 的集成光子陀螺能够

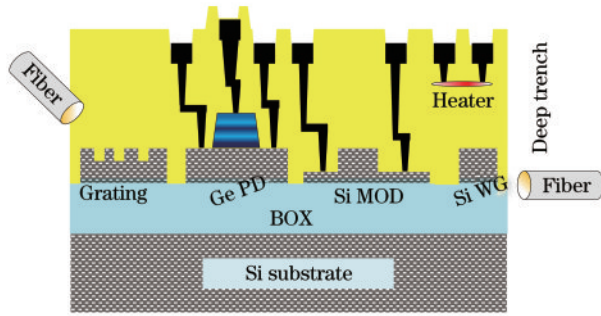


图 1 集成硅光子学平台的横截面示意图
Fig. 1 Schematic diagram of SOI structure

获得更低的损耗、更高的集成度,有利于研制低损耗、高精细度的波导环形谐振腔。最近基于硅光集成的光子陀螺敏感单元设计取得了重要进展,相关成果将在后文阐述。

2.2 基于 InP 材料的集成光学平台

InP 材料作为宽禁带半导体材料,在高速、高频有源集成光子器件等方面有着广泛的应用,InP 光子集成(PICs)的研究已经达到了商业化阶段,在光通信收发模块有着广泛应用^[16],图 2 为 InP 基光子集成工艺流程简图和扫描电子显微镜(SEM)图。InP 基光子集成工艺技术比较复杂,涉及有源和无源结构的多次外延,目前只有两个代工厂提供商业

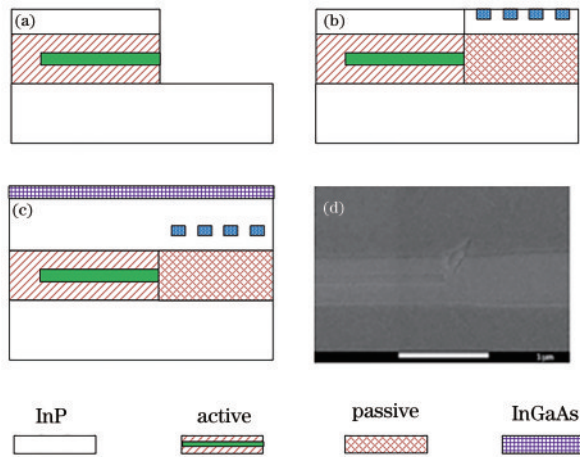


图 2 InP 基光子集成的有源和无源结构端面对准工艺过程简图和 SEM 图。(a)InP 上的有源薄膜层生长与结构刻蚀;(b)端面对准二次外延无源波导与光栅层;(c)常规介质覆盖层;(d)SEM 图片

Fig. 2 Schematic diagram and SEM image of the end-face alignment process of InP-based photonic integration of active and passive structures. (a) Active thin film growth and structure etching on InP; (b) passive layer regrowth and grating patterning; (c) common top cladding growth; (d) SEM image

服务,由欧洲 JePPIX 机构代理的 MPW 流片为用户降低了工艺成本。

2013 年 Ciminelli 等^[17] 在 InP 上制备了 InGaAsP 脊波导环形谐振腔,波导的传输损耗为 0.5 dB/cm。在谐振腔的结构上,作者对直波导与环形谐振腔之间的间距进行了分析和优化,为了增强 InP 波导与光纤的耦合,直波导的两端采用了锥形设计,谐振腔的结构如图 3(a)所示。最终得到了直径为 2.6 cm,品质因数为 7.4×10^5 的 InP 环形微腔。

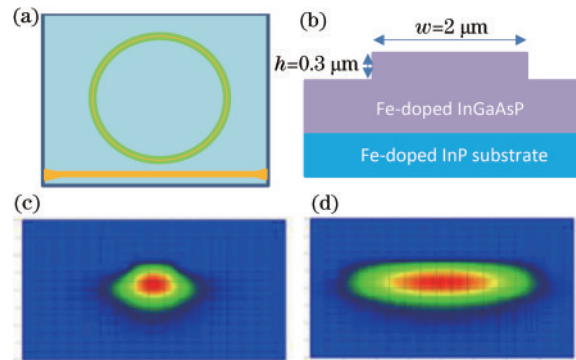


图 3 InP 光波导谐振腔^[17]。(a) InP 光波导谐振腔结构;(b)低损耗 InGaAsP/InP 脊形波导;(c)锥形输入端的光场分布;(d)锥形输出端的光场分布

Fig. 3 InP optical waveguide resonator^[17]. (a) InP optical waveguide resonant cavity structure; (b) low loss InGaAsP/InP ridge waveguide; (c) light field distribution at the tapered input; (d) light field distribution at tapered output

2.3 有机聚合物材料集成光学平台

有机聚合物材料在光电子集成和光互连应用中表现出热损耗小、工艺简单、成本低的特点,是受到诸多关注的集成光学陀螺材料平台之一。应用比较广泛的聚合物波导材料主要包括丙烯酸甲酯类、环氧树脂类、聚硅氧烷和氟化聚酸亚胺等^[18],其相关参数如表 1 所示。

1) 丙烯酸酯类。丙烯酸酯中最具代表性的是聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA),它的优点在于制作和取材非常简单。在较短波长段,这种材料对光的吸收几乎为零,在 1310 nm 和 1550 nm 长波段对光的吸收特别强,一般通过氘代或者氟代来改善其长波段透光性能。

2) 环氧树脂类。环氧树脂热稳定性和机械强度非常好,而且与 PMMA 相比,具有更好的双折射率,而且其制作价格也相当的低廉。该材料分子间

作用力较强,制作成品相对困难。

3)聚硅氧烷。聚硅氧烷的优点在于其机械性能非常好,拥有较好的热稳定性和光学特性。

4)氟化聚酰亚胺。有机聚合物波导中,聚酰亚胺是一种性能非常优秀的波导材料,具有优良的耐高温特性,而且氟化聚酰亚胺吸收损耗降到了 0.1 dB/cm。但是该材料的制作成本较高。

表 1 常见聚合物波导性能参数^[19]

Table 1 Common polymer waveguide performance parameter^[19]

Material	Wavelength / μm	Loss / $(\text{dB}\cdot\text{cm}^{-1})$
PMMA	0.63	0.05
Epoxy resin	0.83	0.40
Polysiloxane	0.40–0.75	0.04

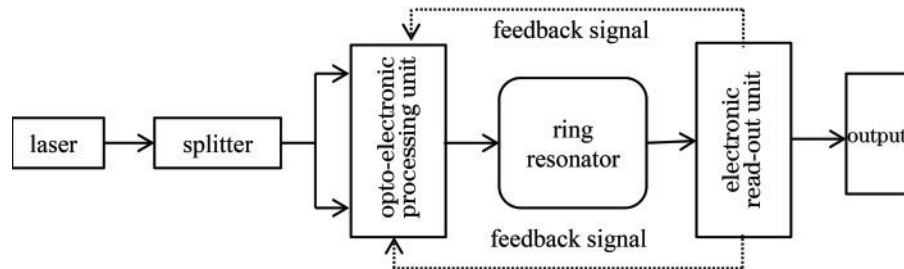


图 4 集成光学陀螺仪结构单元

Fig. 4 Integrated optical gyroscope structural unit

前期谐振式集成光学陀螺仪的谐振腔是单环耦合单波导,在此基础上逐渐演变出多种结构,比如单环耦合双波导结构、多环嵌套耦合结构以及三角形、正方形、圆形谐振腔结构。下文分别对不同的结构形式做具体介绍。

3.1 基于环形波导的谐振腔结构

3.1.1 单片环形谐振腔

陀螺仪系统主要噪声包括偏振噪声、背散噪声、克尔噪声等,对陀螺仪的性能有很大的影响^[20]。Suzuki等^[21-22]提出一种基于二氧化硅平面波导的单片式集成光学陀螺仪,结构如图 5 所示。通过把微环谐振腔和其他光学器件集成在一块芯片上的方式来抑制噪声源。该结构由环形谐振器、热光调制器、两个光电探测器、硅薄膜和马赫-曾德尔干涉仪(MZI)光开关构成。系统中的噪声主要分为偏振波动引起的噪声和背散噪声两类。通过基于热光调制器的二进制相移键控(BPSK)调控频率响应的波形来减小系统中的背散噪声;通过波导上的硅薄膜对二氧化硅波导施加一定的压应力,可以减少因偏振波动效应带来的噪声,环形谐振腔的品质因子 Q

基于不同材料的集成光学平台的技术不断发展,为低损耗、高精度的微型光学环形谐振腔器件的出现和应用提供技术支撑,并为其应用在集成光子陀螺仪的光学敏感单元奠定坚实的基础。

3 集成光学陀螺的结构设计

谐振式集成光学陀螺仪系统由窄线宽激光器、高 Q 值谐振腔、光电处理单元、两个光电探测器(PD)、电路处理及输出单元组成,如图 4 所示。图中环形谐振腔结构是系统中最重要单元之一,为提高陀螺仪的灵敏度性能参数,除了在集成材料方面的研究,各种新型结构形式的谐振腔也得到了广泛的研究。

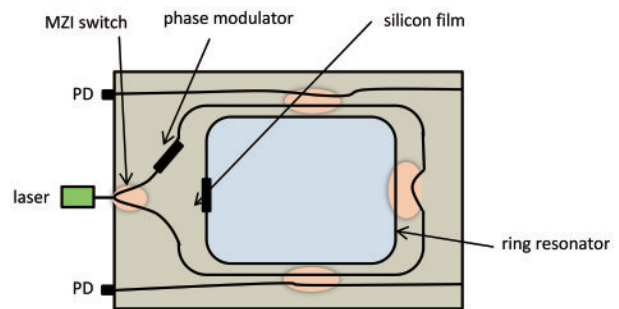


图 5 单片集成陀螺仪谐振腔结构^[21-22]

Fig. 5 Monolithic integrated gyro resonator cavity structure^[21-22]

可以达到 2×10^6 ,其传输损耗为 0.024 dB/cm,零偏稳定性达到了 $45 (^{\circ})/\text{s}$ 。

环形谐振腔的品质因子对陀螺仪的灵敏度有着很大影响,图 6 中的两种结构形式的谐振腔是通过降低材料损耗、使用光放大器(SOA)补偿损耗的方法来提升 Q 值。如图 6(a)所示,Hsiao等^[23]提出的玻璃掺杂的双跑道谐振腔,品质因子达到 1.9×10^7 。图 6(b)为 Ciminelli等^[24]提出的可以进行损耗补偿的谐振腔结构。设计的结构在谐振腔内的对称位置上集成两个半导体放大器(SOA)达到补偿

传播损耗的目的。研究表明,该结构品质因子可以达到 2.9×10^8 , 目前只见到理论设计结果。

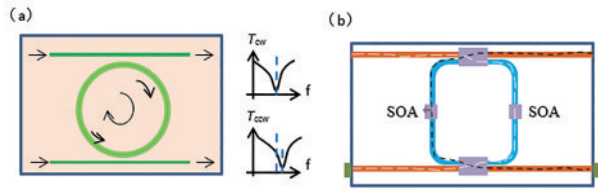


图 6 两种结构形式的谐振腔。(a) 双跑道谐振腔结构^[23]; (b) 具有损耗补偿的谐振腔结构^[24]
Fig. 6 Two structural forms of resonant cavity. (a) Double runway resonant cavity structure^[23]; (b) resonant cavity structure with loss compensation^[24]

2011年, Yu等^[25]提出由可调频激光器、光隔离器、集成光学调制器以及双集成波导谐振腔组成的双谐振陀螺仪系统, 如图 7(a)所示。各器件通过保偏光纤连接, 其中关键器件双谐振腔通过等离子体增强化学气相淀积、等离子体刻蚀等微加工工艺制作而成。被调制的光波经过铌酸锂波导上的金属薄膜, 横磁(TM)偏振的光被吸收, 只有横电(TE)偏振的光波入射到谐振腔, 并设计波导满足单模条件, 在此条件下可以抑制谐振腔内的模式耦合噪声; 文中设计的双谐振腔结构的三维模型如图 7(b)所示。如果两个反方向的光束进入同一个谐振腔, 需要考虑瑞利背散噪声的影响, 而本文的创新点是将入射光分别从逆时针、顺时针方向耦合进入不同的谐振器, 这样反向瑞利背散噪声对谐振腔的灵敏度没有实际影响。仿真结果显示, 双谐振器结构可以使陀螺仪灵敏度提高约 $50 (^{\circ})/h$ 。

2014年, 北京航空航天大学 Feng等^[26]提出基

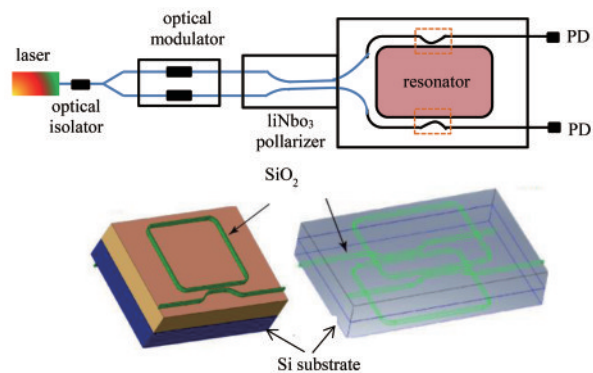


图 7 双谐振腔构成的陀螺仪系统^[25]。(a) 系统结构图; (b) SiO₂ 双谐振器的结构
Fig. 7 Gyroscope system composed of double resonant cavities^[25]. (a) System structure diagram; (b) architecture of SiO₂ dual-resonator

于透射式平面矩形波导谐振腔的谐振式集成光学陀螺仪。如图 8所示, 主要由窄线宽激光器、相位调制器、基于 SiO₂的透射式波导谐振腔以及光电检测单元组成。研制的直径为 35 mm 的谐振腔品质因子达到 6.13×10^6 , 通过控制 TE/TM 模式相位差, 1 h 测试时间内在 10 s 积分时间下得到零偏稳定性为 $0.22 (^{\circ})/s$, 测试分析表明陀螺仪的精细度大于 59, 理论灵敏度可以达到 $5 (^{\circ})/h$, 并且通过艾伦方差分析, 在 10000 s 测试中没有发现明显的漂移, 表明该结构对于陀螺仪的长期稳定漂移具有一定的改善作用。2015年, 该课题组提出采用梯形相位调制技术的谐振式集成光学陀螺仪, 3000 s 测试时间内在 10 s 积分时间下得到零偏稳定性为 $0.09 (^{\circ})/s$ ^[27], 这对集成光学陀螺仪系统中的噪声和误差分布的研究以及通过适当补偿改善系统的性能有很重要的参考意义。

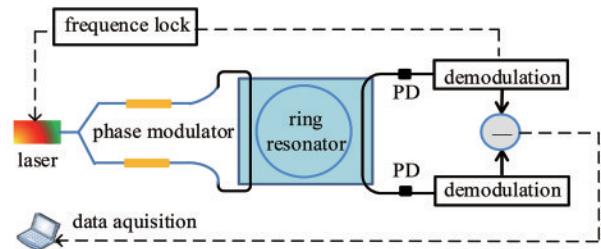


图 8 基于硅基二氧化硅波导的透射式谐振器的光学陀螺仪示意图^[26]
Fig. 8 Sketch map of transmissive resonator optic gyro based on silica-on-silicon waveguide^[26]

3.1.2 三环光波导谐振腔结构

2013年, Ciminelli等^[28]提出一种新的三环谐振腔结构, 该结构由三个不同半径和耦合比的环形谐振腔以及两个直波导组成, 如图 9所示。该研究验证了三环耦合集成光学陀螺仪对频率敏感的可行性, 从反向传播的两个模式的谐振频率之间的偏移计算陀螺仪的角速度。在耦合环具有不同的尺寸并且环间耦合系数低于环-总线耦合系数的条件下, 通过优化各环半径、环间的耦合系数, 可得到相对

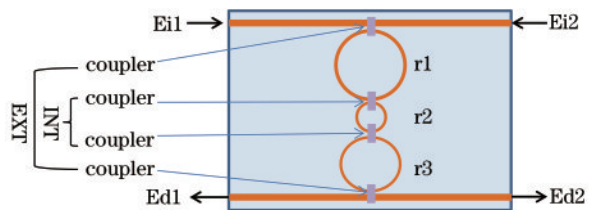


图 9 三环谐振腔结构示意图^[28]
Fig. 9 Configuration of triple-ring resonator configuration^[28]

于相同面积的单环谐振器,三环谐振腔结构具有更明显的谐振波长差。研究表明,该方法可以在不增加传感器覆盖面积的情况下提高谐振腔的品质因子。同时,文章指出三环谐振腔结构相对于单环谐振腔传感器的覆盖面积可减小为 $1/1.88$,其品质因子可以达到 10^6 。这对于制作小型化、高性能集成光学器件具有重要指导意义。

3.1.3 多环光波导谐振腔结构

2006年,Scheuer等^[29]提出一种多环耦合谐振腔结构,如图10所示,沿弧线排列尺寸相同的五个环形腔,光源在分束器处形成两个反向传播光束的干涉信号,每个臂中的信号耦合到多环谐振腔的不同端。该结构表现出一种新型的Sagnac效应,这些环形腔包围的总面积不影响输出信号。本文分析指出,对实际应用而言,与传统的Sagnac环路相比,该器件结构表现出以下固有优点:1)陀螺仪输出信号对环间耦合的依赖性允许其在不占用较大面积的情况下提高器件的灵敏度;2)环与环之间表现出独立性,可以对环的位置适当排列以充分利用芯片面积。多环光学腔对谐振器尺寸和损耗提出了严格的制作要求。制作过程必须确保对环形半径、环与环之间以及环与直波导之间耦合间距精确控制。

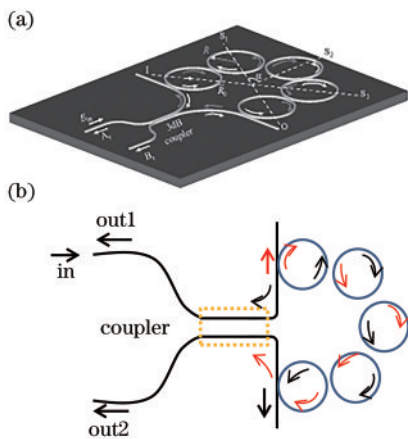


图10 多环结构的谐振腔^[29]。(a)三维模型;(b)俯视图
Fig. 10 Configuration of multi-ring resonant cavity^[29]. (a) Three-dimensional model; (b) top view

3.2 基于光子晶体的谐振腔结构

3.2.1 二维光子晶体谐振腔结构的陀螺仪

光子晶体是一种新型的光学结构,在生物传感器、滤波器、光开关^[30-32]等方面取得了一定研究成果。基于光子晶体结构的Sagnac效应广泛用于压力、温度以及旋转角速度检测^[33-35]。

2019年,伊朗德黑兰希德教师培训大学Mohammadi等^[36]提出一种基于光子晶体环形谐振腔(PCRR)结构的集成光学陀螺仪,敏感单元由二维光子晶体PCRR和总线波导组成。文中提出的基于二维光子晶体的集成光学敏感结构如图11所示,由一个3 dB耦合器、两个总线波导和五个环形谐振腔组成。该结构的优点是可以灵活地改变内外环的直径以及环之间的耦合间距来减小环和波导之间的封闭面积。在结构上通过调节环形谐振腔的半径和折射率,提高了环形谐振腔与波导之间的耦合效率。通过仿真计算得出光子晶体环形谐振器品质因子为4485,在1551 nm波长处功率传输效率可以达到91.6%,结构尺寸仅有 $279 \mu\text{m}^2$ 。

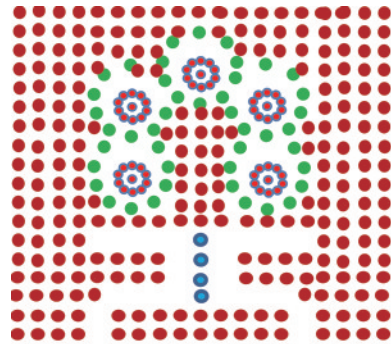


图11 基于二维光子晶体集成光学结构示意图^[36]
Fig. 11 Schematic diagram of integrated optical structure based on two-dimensional photonic crystal^[36]

3.2.2 一维光子晶体谐振腔结构的陀螺仪

为了提高谐振式集成光学陀螺仪中环形谐振腔的Q值,2018年,Ciminelli等^[37]设计一种环形波导与一维光子晶体相结合的谐振腔,即在环形谐振腔的谐振路径中制作一维光子晶体,其结构如图12所示。该方案基于二氧化硅波导工艺设计环形腔,直径为4.59 cm,环形谐振腔分布着低折射率的布拉格光栅,该光栅可以通过紫外刻写技术制作。在传播损耗为0.07 dB/cm条件下,谐振腔的品质因子可以达到 7×10^9 。

3.3 基于螺线圈形式的谐振腔结构

3.3.1 螺旋式谐振腔结构

提高谐振式集成光学陀螺仪性能的另一个解决方案是采用螺旋式谐振器结构。螺旋式结构可以增加谐振器的光路,同时可以减小器件的尺寸。2008年浙江大学Ma等^[38]提出一种三螺旋掺锗二氧化硅波导结构,如图13所示,其两个交叉点角度接

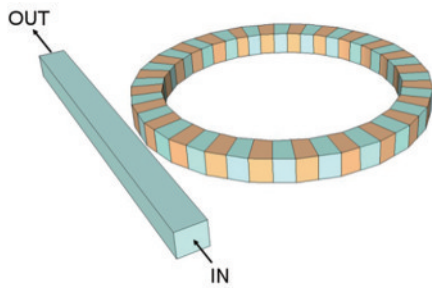
图 12 基于一维光子晶体的微环谐振腔结构^[37]

Fig. 12 Micro-ring resonant cavity structure based on one-dimensional photonic crystal^[37]

近 90° , 以达到减小损耗和串扰的目的, 并在二氧化硅平面波导上设计制作不同交叉角度的交叉波导。在此基础上, 他们还分析了波导回路数量以及交叉波导的损耗对陀螺仪灵敏度的影响, 当多圈光波导微环谐振腔的交角大于临界角时, 才能通过增加谐振腔光波导的圈数来提高陀螺仪的灵敏度。数值计算表明, 当交角小于临界角时, 交叉波导的损耗会降低陀螺仪的灵敏度。该课题组通过制作不同交角的交叉波导, 使用有限差分法分析了传输损耗和交角之间的关系。研究表明, 当交角超过 40° 时, 可有效降低波导传输损耗和串扰对陀螺仪灵敏度的影响, 传输损耗低至 0.3 dB 。

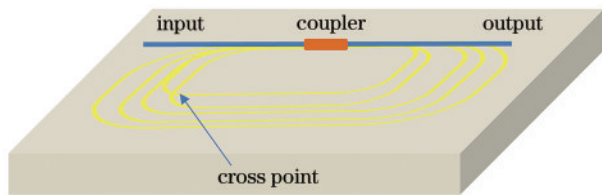
图 13 多圈光波导环形谐振器的示意图^[38]

Fig. 13 Schematic diagram of multi-turn optical waveguide ring resonator^[38]

2012年, Ciminelli等^[39]以螺旋式谐振器为敏感元件, 提出一种高 Q 值微环谐振器, 其结构示意图如图 14 所示, 谐振腔的螺旋结构长 42 cm , 敏感单元面积为 20 cm^2 。光波导交角处的交叉角度接近 90° , 使得额外损耗小于 0.01 dB 。实验结构原理图包括光源、偏振控制器、信号发生器、光电探测器等模块, 实验结果表明, 基于螺旋谐振腔的集成光学陀螺仪的分辨率小于 $10^\circ/\text{h}$, 谐振腔品质因子达到 1.5×10^6 。

3.3.2 模式辅助干涉式集成光学陀螺仪

2019年, 华中科技大学余宇课题组提出一种模式辅助干涉式集成波导陀螺仪结构^[40], 其结构的设

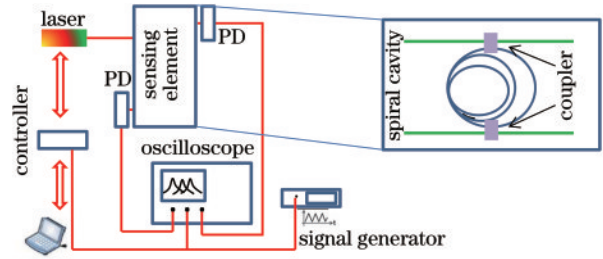
图 14 多圈光波导谐振腔结构及陀螺仪系统结构示意图^[39]

Fig. 14 Schematic diagram of multi-turn optical waveguide resonator structure and gyroscope system structure^[39]

计如图 15 所示, 即利用螺旋线圈形状的波导中两种不同光波导模式的反向传播, 形成固定的相位差从而实现灵敏度的检测。为了消除偏置漂移和反射误差, 设置图 15(a) 结构作为参考传感元件。参考传感元件中 TE_0 和 TE_1 模式与图 15(b) 中模式方向相反。 TE 模式在两种结构中沿着相同的光路传播, 具有相同的相位偏移和相位误差。因旋转引起的相位变化具有方向性, 两种结构检测到的信号是相反的。对感测元件和参考感测元件的检测信号做差值, 可以消除误差并提取旋转信号。仿真结果表明, 该结构可检测角速率达到 $0.64^\circ/\text{s}$, 该方案与传统方案相比不需要集成相位调制器和环形器, 降低了工艺结构的复杂度和制作难度, 尺寸仅为 $3.85 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ 。

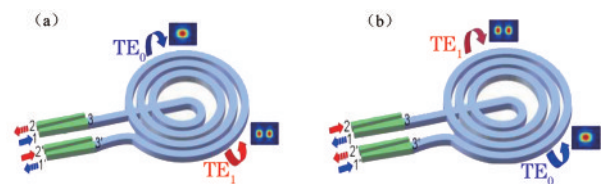
图 15 模式辅助陀螺仪谐振腔结构示意图^[40]。(a) 传感单元结构; (b) 参考传感单元

Fig. 15 Schematic diagram of resonant cavity of mode-assisted gyroscope^[40]. (a) Sensing element; (b) reference sensing element

3.4 具有创新结构形式的谐振腔

3.4.1 具有“互易性”灵敏度增强效果的谐振腔结构

2018年, 美国加州理工学院 Khial等^[41]提出一种具有互易灵敏度增强效果的谐振腔结构, 减小主要误差源, 提高陀螺仪的灵敏度。文章介绍设计出的集成光学陀螺仪大小仅有 2 mm^2 , 这种集成光学陀螺是目前最先进的微型光纤陀螺仪的 $1/500$, 但能够检测的相移却是后者的 $1/30$, 使这种光学陀螺

性能的整体提升达到了 1~2 个数量级。

该团队设计的谐振腔如图 16(a) 所示, 整个系统主要包括光源、MZI 调制器、光电探测器以及谐振腔结构, 其中谐振腔由两个环形腔及直波导组成。通过 MZI 电光调制, 可以不断地以远高于热波动的速率交替光学路径, 如图 16(b) 所示。穿过硅光波导的信号“极性”被反转, 而不需要的热波动和失配等共模分量则被抵消。在这种情况下, “互易性”意味着陀螺仪光波导内的两个光束都以相同的方式受到误差的影响。研究表明, 与使用非相干光源或采用低损耗波导等方案相比, “互易性”灵敏度增强方案具有集成度高、灵敏度高等优点。

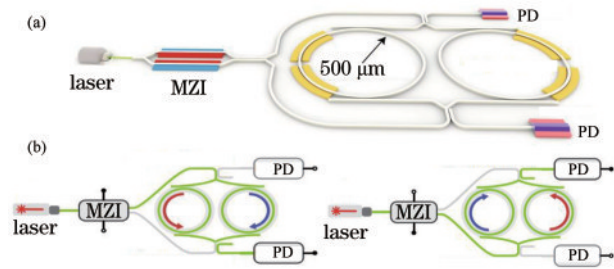


图 16 互易性灵敏度增强谐振腔^[41]。(a) 结构图; (b) 交替转换的光路示意图

Fig. 16 Resonant cavity with reciprocal sensitivity enhancement^[41]. (a) Structure chart; (b) schematic diagram of alternating light path

3.4.2 多间隙垂直环形表面等离子体波导环形腔

2019 年, 中北大学刘吉课题组提出一种基于多间隙表面等离子体光波导谐振腔的光学陀螺仪设计方案^[42]。多间隙表面等离子体波导环形谐振腔结构如图 17(a) 所示, R 是环形谐振腔半径, k 是波导间的耦合系数。图 17(b) 为多间隙表面等离子体波导横截面示意图, 由几个垂直的金属银薄膜组成, 薄膜之间需要留有间隙。其中 h 代表环形波导的总高度, w 代表薄膜的宽度, d 是每个间隙的宽度。通过理论分析以及软件仿真, 研究了不同有效折射率模型下金属薄膜层数、间隙宽度和弯曲半径等参数对陀螺仪系统性能的影响。文中采用轴对称坐标系和模态分析方法, 研究表明: 当耦合比大于 60% 时, 金属薄膜层数为 3、间隙宽度 $0.9 \mu\text{m}$ 和弯曲半径为 3 cm 的陀螺仪灵敏度小于 $3 (^{\circ})/\text{h}$ 。与其他研究小组的结果比较可知^[43], 其波导损耗进一步减小, 陀螺仪的灵敏度得到提高。在多间隙表面等离子体光波导结构中, 通过选择合理的金属薄膜数量、间隙宽度和弯曲半径, 可减小光

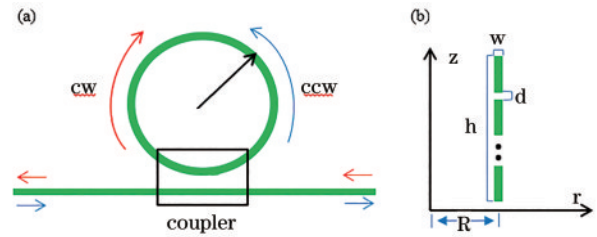


图 17 基于多间隙表面等离子体光波导谐振腔的光学陀螺仪设计方案^[42]。(a) 结构图; (b) 波导横截面示意图

Fig. 17 Design scheme of optical gyroscope based on a multi-gap surface plasmon waveguide^[42]. (a) Structure chart; (b) cross section of multi-gap optical waveguide ring resonator

学陀螺的损耗、提高陀螺仪的灵敏度。

3.4.3 与 MZI 调制器结合的光波导谐振腔结构

2019 年, 俄罗斯联邦圣彼得堡国立大学 Filatov 等^[44]在文章中指出目前以环形谐振腔为基础的陀螺仪在确定角速度时都需要对谐振器进行频率扫描, 通过输出端的信号确定两光束间的频差, 最终得出所测的角速度值^[6,45-46]。本文在谐振式光学陀螺仪的结构和工作原理上提出一种全新的研究, 即一种与马赫-曾德尔调制器相结合的集成光波导谐振腔结构, 如图 18 所示, MZI 两臂上分别与环形波导谐振腔和相位调制器相连接, 使得集成光学陀螺仪设计简化, 具有较好的集成度、灵敏度, 在光源选择方面使用体积相对小的恒频激光器代替常用的可调谐激光器。

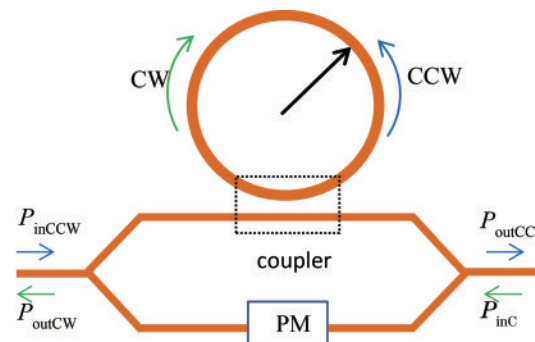


图 18 与 MZI 结合的谐振腔结构

Fig. 18 Configuration of resonant cavity structure combined with MZI

研究表明, 角速度可以通过马赫-曾德尔调制器输出端的辐射功率的最大值和最小值之间的差值决定; 当调制器的一个臂的光路被调制时, 由差值的相移来确定角速度。但该方案的一个不足之处是测量范围有限, 角速度测量范围约为

1500 rad/s。为了扩大工作范围,可以使用具有较低品质因数的谐振器作为陀螺仪的一部分,但在这种情况下,测量灵敏度会降低。虽然此方案目前存在不足之处,但是为我们提供了一个新的研究角度。

3.4.4 超高 Q 硅基跑道型微腔结构

2020年,浙江大学戴道铎课题组报道了超高 Q 硅基跑道型微腔的研究成果^[47]。文中提出一种基于均匀宽波导模场调控的超高 Q 跑道型微腔结构,由两个多模直波导和两个特殊的欧拉曲线型弯曲宽波导组成,结构如图 19 所示。这种结构不仅具有超小的弯曲半径,而且不会激励波导中的高阶模式。通过宽波导模场调控的方法显著降低了侧壁散射损耗,获得了超低损耗的基模光场传输,从而实现超高 Q 硅基跑道型微腔。文中指出该结构工艺简单,采用标准流片工艺制作。该结构的 Q 值高达 2.3×10^6 ,而且在 $Q > 10^6$ 的微腔中尺寸是最小的。文中提出的结构为实现高性能硅光器件提供了新的设计思路,对突破光滤波器、非线性器件等关键器件的性能瓶颈具有重要意义,对于进一步缩小谐振式集成陀螺仪也有一定的参考价值。

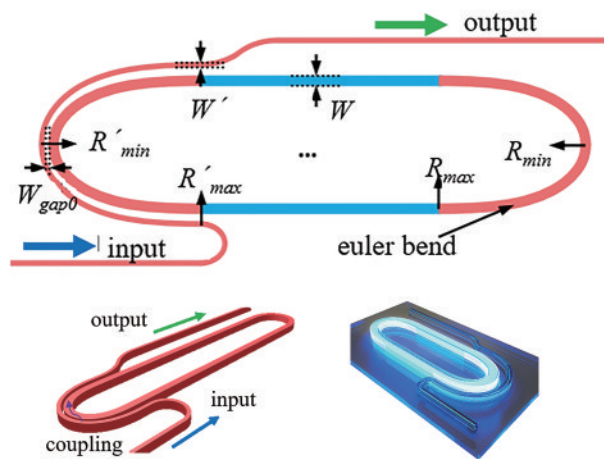


图 19 跑道型超高 Q 微腔结构图^[47]。(a) 三维模型;(b) 俯视图
Fig. 19 Schematic diagram of track-type ultrahigh- Q microcavity^[47]. (a) Three-dimensional view;(b) top view

4 结 论

本文对近年来人们对集成光学陀螺仪中谐振腔的材料、结构形式的研究做出了总结。光波导谐振腔结构形式、品质因子 Q 值都直接影响集成光学陀螺仪的灵敏度,高集成度、低损耗环形谐振腔成为光学陀螺仪的必然要求。在光学敏感单元的材料方面,基于 SOI 材料的集成光学谐振腔结构由于芯

层和包层间较大的折射率差,SOI 材料可以实现小尺寸的光波导器件;此外由于具有低传输损耗和良好的热稳定性,硅基光子技术的发展使得有源和无源器件集成,并成为最有潜力的集成光学陀螺的平台。在谐振腔的结构形式方面,本文总结研究了基于环形波导谐振腔结构、基于光子晶体结构、基于螺线圈形式以及具有创新形式的结构。

未来惯性技术和器件发展的方向是低成本、批量化、小体积、高精度、抗过载等。陀螺仪系统的光电混合集成乃至片上一体化集成方案是实现这一目标的有效方法。我们可以认为光电混合片上一体化集成、基于经典结构创新研究新的结构形式、探究更加理想的材料,以及进一步提升集成光学陀螺的各项指标,是今后一段时期的研究方向。

5 参 考 文 献

- [1] He Y M, Yang F H, Yan W, et al. Phase modulation techniques for suppressing backscattering noise in resonator integrated optic gyroscopes [J]. Chinese Optics, 2019, 12(6): 1403-1417.
何玉铭, 杨富华, 颜伟等. 谐振式集成光学陀螺系统中用于抑制背散射噪声的相位调制技术 [J]. 中国光学, 2019, 12(6): 1403-1417.
- [2] Qian W W, Wu C B, Lin Y, et al. Resonant micro-optical gyroscope based on optical switch to suppress backscattering noise [J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(10): 1010003.
钱伟文, 吴传斌, 林伊, 等. 基于光开关抑制背向散射噪声的谐振式微光学陀螺 [J]. 中国激光, 2020, 47(10): 1010003.
- [3] Adar R, Serbin M R, Mizrahi V. Less than 1 dB per meter propagation loss of silica waveguides measured using a ring resonator [J]. Journal of Lightwave Technology, 1994, 12(8): 1369-1372.
- [4] Tien M C, Bauters J F, Heck M J R, et al. Ultra-high quality factor planar Si_3N_4 ring resonators on Si substrates [J]. Optics Express, 2011, 19(14): 13551-13556.
- [5] Spencer D T, Tang Y B, Bauters J F, et al. Integrated $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2$ ultra high Q ring resonators [C]//IEEE Photonics Conference 2012, September 23-27, 2012, Burlingame, CA, USA. New York: IEEE Press, 2012: 141-142.
- [6] Carriere J T A, Frantz J A, Honkanen S, et al. An integrated optic gyroscope using ion-exchanged

- waveguides [C] // The 16th Annual Meeting of the IEEE Lasers and Electro-Optics Society, 2003. LEOS 2003, October 27-28, 2003, Tucson, AZ, USA. New York: IEEE Press, 2003: 99-100.
- [8] Li G Y, Winick K A. Integrated optical ring resonators fabricated by silver ion-exchange in glass [C] // Conference on Lasers and Electro-Optics, 2004. (CLEO), May 16-21, 2004, San Francisco, CA, USA. New York: IEEE Press, 2004: 2.
- [9] Poon J K S, Zhu L, Derosé G A, et al. Polymer microring coupled-resonator optical waveguides [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2006, 24(4): 1843-1849.
- [10] Vannahme C, Suche H, Reza S, et al. Integrated optical Ti:LiNbO₃ ring resonator for rotation rate sensing [C] // European Conference on Integrated Optics, IEEE, 2007.
- [11] Dell'Olivo F, Ciminelli C, Armenise M N, et al. Design, fabrication, and preliminary test results of a new InGaAsP/InP high-Q ring resonator for gyro applications [C] // 2012 International Conference on Indium Phosphide and Related Materials, August 27-30, 2012, Santa Barbara, CA, USA. New York: IEEE Press, 2012: 124-127.
- [12] Ye W N, Xiong Y L. Review of silicon photonics: history and recent advances [J]. *Journal of Modern Optics*, 2013, 60(16): 1299-1320.
- [13] Bogaerts W, Chrostowski L. Silicon photonics circuit design: methods, tools and challenges [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2018, 12(4): 1700237.
- [14] Dai D X. Advanced passive silicon photonic devices with asymmetric waveguide structures [J]. *Proceedings of the IEEE*, 2018, 106(12): 2117-2143.
- [15] Du K, Wang R R, Li M W, et al. Fabrication and structure measurement of the double-barrier nano film resonant tunneling gyroscope [J]. *Advanced Materials Research*, 2010, 97(101): 4225-4229.
- [16] Smit M, Leijtens X, Ambrosius H, et al. An introduction to InP-based generic integration technology [J]. *Semiconductor science and technology*, 2014, 29(8): 65-70.
- [17] Ciminelli C, Dell'Olivo 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.
- [18] Tang J. Research on polymer resonant integrated optic gyroscope [D]. Nanjing: Southeast University, 2019.
- 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.
- [19] Qian G. Study of photonic resonators based on polymer waveguide [D]. Nanjing: Southeast University, 2017.
- 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.
- [20] Lei M, Yu H Y, Fang Y, et al. Out-of-lock frequency-tracking control of resonant fiber-optic gyro [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(1): 0106002.
- 雷明, 于怀勇, 方圆, 等. 谐振式光纤陀螺频率跟踪失锁控制研究 [J]. *中国激光*, 2020, 47(1): 0106002.
- [21] Suzuki K, Takiguchi K, Hotate K. Monolithically integrated resonator microoptic gyro on silica planar lightwave circuit [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2000, 18(1): 66-72.
- [22] Hotate K, Takiguchi K, Hirose A. Adjustment-free method to eliminate the noise induced by the backscattering in an optical passive ring-resonator gyro [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1990, 2(1): 75-77.
- [23] Hsiao H K, Winick K A. Planar glass waveguide ring resonators with gain [J]. *Optics Express*, 2007, 15(26): 17783-17797.
- [24] Ciminelli C, Peluso F, Armenise M N. A new integrated optical angular velocity sensor [J]. *Proceedings of SPIE*, 2005, 5728: 93-100.
- [25] Yu H Y, Zhang C X, Feng L S, et al. Optical noise analysis in dual-resonator structural micro-optic gyro [J]. *Chinese Physics Letters*, 2011, 28(8): 084203.
- [26] Feng L, Wang J, Zhi Y, et al. Transmissive resonator optic gyro based on silica waveguide ring resonator [J]. *Optics Express*, 2014, 22(22): 27565-27575.
- [27] Wang J J, Feng L S, Tang Y C, et al. Resonator integrated optic gyro employing trapezoidal phase modulation technique [J]. *Optics Letters*, 2015, 40(2): 155-158.
- [28] Ciminelli C, Campanella C E, Dell'Olivo 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.
- [29] Scheuer J, Yariv A. Sagnac effect in coupled-resonator slow-light waveguide structures [J]. *Physical Review Letters*, 2006, 96(5): 053901.

- [30] Robinson S, Dhanalaksmi N. Photonic crystal based biosensor for the detection of glucose concentration in urine[J]. *Photonic Sensors*, 2017, 7(1): 11-19.
- [31] Li J S. Fast-response terahertz wave switch based on T-shaped photonic crystal waveguide[J]. *Optik*, 2014, 125(13): 3221-3223.
- [32] Seifouri M, Fallahi V, Olyae S. Ultra-high-Q optical filter based on photonic crystal ring resonator [J]. *Photonic Network Communications*, 2018, 35(2): 225-230.
- [33] Fu H Y, Tam H Y, Shao L Y, et al. Pressure sensor realized with polarization-maintaining photonic crystal fiber-based Sagnac interferometer [J]. *Applied Optics*, 2008, 47(15): 2835-2839.
- [34] Chen W G, Lou S Q, Wang L W, et al. Highly sensitive torsion sensor based on Sagnac interferometer using side-leakage photonic crystal fiber [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2011, 23(21): 1639-1641.
- [35] Yang Y H, Yang F L, Wang H, et al. Temperature-insensitive hydrogen sensor with polarization-maintaining photonic crystal fiber-based Sagnac interferometer [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2015, 33(12): 2566-2571.
- [36] 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.
- [37] Ciminelli C, Campanella E C, Armenise M N. Optical rotation sensor as well as method of manufacturing an optical rotation sensor: US9863771 [P]. 2018-01-09.
- [38] Ma H L, Wang S J, Jin Z H. Silica waveguide ring resonators with multi-turn structure [J]. *Optics Communications*, 2008, 281(9): 2509-2512.
- [39] Ciminelli C, Dell'Olio F, Armenise M N. High-Q spiral resonator for optical gyroscope applications: numerical and experimental investigation [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2012, 4(5): 1844-1854.
- [40] Wu B B, Yu Y, Zhang X L. Mode-assisted silicon integrated interferometric optical gyroscope [J]. *Scientific Reports*, 2019, 9: 12946.
- [41] Khial P P, White A D, Hajimiri A. Nanophotonic optical gyroscope with reciprocal sensitivity enhancement[J]. *Nature Photonics*, 2018, 12(11): 671-675.
- [42] Liu J, Yu L X. Optical gyroscope based on multi-gap surface [J]. *Journal of Applied Science and Engineering*, 2019, 22(2): 299-306.
- [43] Li W, Zhang T, Zhang X Y, et al. Theoretical analysis of long range surface plasmon polaritons waveguide gyroscope [J]. *Nanoscience and Nanotechnology Letters*, 2013, 5(2): 126-129.
- [44] Filatov Y V, Gorelaya A V, Kukaev A S, et al. Resonator micro-optical gyroscope with Mach-Zehnder modulator[J]. *Proceedings of SPIE*, 2019, 1116: 111630E.
- [45] Strandjord L K, Qiu T, Salit M, et al. Improved bias performance in resonator fiber optic gyros using a novel modulation method for error suppression [C]//26th International Conference on Optical Fiber Sensors, Lausanne. Washington, D. C.: OSA, 2018: ThD3.
- [46] Li H, Liu L, Lin Z, et al. Double closed-loop control of integrated optical resonance gyroscope with mean-square exponential stability [J]. *Optics Express*, 2018, 26(2): 1145-1160.
- [47] Zhang L, Jie L L, Zhang M, et al. Ultrahigh-Q silicon racetrack resonators[J]. *Photonics Research*, 2020, 8(5): 684-689.