先进光纤传感技术专题

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2022071901

集成化光纤陀螺发展现状及趋势

雷 明*，李豪伟，于晓之，欧 姮，徐 磊，杨 怿，向 强，张丽哲

（北京自动化控制设备研究所 惯性技术国防科技重点实验室，北京 100074）

摘 要： 无人机、机器人以及自动驾驶等领域对光纤陀螺尺寸、重量、成本综合性能提升有着迫切的需求，具有小体积、高性能、低成本等技术优势的集成化光纤陀螺成为目前的研究热点。文章梳理了美国、俄罗斯等在集成化光纤陀螺方面的最新研究成果和产品技术动态，从集成光学芯片设计加工、微小型高对称光纤环圈绕制、集成光学芯片与微小型光纤环圈直接耦合三个方面，阐述了集成化光纤陀螺面临的技术和工艺难题，分析了解决方案。最后，展望了集成化光纤陀螺的未来发展趋势和应用前景。

关键词： 集成化光纤陀螺；集成光学芯片；微小型光纤环圈；直接耦合

中图分类号： V241.5；TN253 **文章编号：** 1001－5868(2022)04－0666－06

Development Status and Trend of Integrated Fiber Optic Gyroscope

LEI Ming, LI Haowei, YU Xiaozhi, OU Heng,

XU Lei, YANG Yi, XIANG Qiang, ZHANG Lizhe

(Beijing Institute of Automation and Control Equipment, Key Laboratory of National Defense Science and Technology of Inertial Technology, Beijing 100074, CHN)

Abstract: In view of the urgent need to improve the comprehensive performance of fiber optic gyroscopes in the fields of unmanned aerial vehicles, robots and automatic driving, the integrated fiber optic gyroscopes with technical advantages such as small size, high performance and low cost have become the current research hotspot. The latest research results and product technology trends of integrated fiber optic gyroscopes in the United States and Russia were sorted out. The technical and technological problems faced by the integrated fiber optic gyroscope were expounded from three aspects of the design and processing of integrated optical chip, the winding of miniature high-symmetry optical fiber coil, and the direct coupling between integrated optical chip and miniature optical fiber coil, and the solutions were analyzed. Finally, the future development trend and application of the integrated fiber optic gyroscope were prospected.

Key words: integrated fiber optic gyroscope; integrated optical chip; miniature fiber coil; direct coupling

0 引言

光纤陀螺是一种基于光学干涉效应的新一代高性能惯性传感器，具备高精度、全固态、结构灵活等突出优势，已经成为中、高精度惯性导航系统的首选惯性仪表。经过40余年的发展，光纤陀螺的精度范围覆盖0.000 1～10 (°)/h，已广泛应用于海、陆、空、天领域[1-3]。传统光纤陀螺方案主要借助于光通信基础产业，光源、耦合器、调制器、探测器等核心部件均为分立光学器件，这不仅限制了成本的进一步降低，而且增加了进一步小型化的难度。同时，分立光学器件之间需要采用光互联工艺，导致生产复杂，产品一致性难以控制，因此高精度光纤陀螺在小型化

收稿日期：2022－07－19.

基金项目：航天科工集团重大自主创新项目(C041gjdx).

* **通信作者：**雷 明 **E-mail：** 15210985670@163.com

和低成本发展上遇到瓶颈[4-6]。目前，导航级精度(0.01 (°)/h)光纤陀螺外形尺寸一般达到 70～90 mm 以上，单轴光纤陀螺成本价格高达数万元，其中分立光学器件的成本占陀螺总成本的 70%以上，光纤陀螺体积、重量、功耗和成本(Size, Weight, and Power, Cost, SWaP-C)综合性能难以持续提升，这已经成为制约导航系统综合效能提升的瓶颈[7-8]。

光纤陀螺光路由光学器件(包括光源、耦合器、调制器、探测器等)和干涉传感单元组成。随着光电子、微电子和微纳加工技术的迅猛发展，兼具发光、耦合、调制和探测等多种功能的集成光学芯片不断取得突破，目前在光通信领域获得广泛应用，特别是硅基光子器件与传统 CMOS 工艺兼容，具备小体积、高性能、低成本等技术优势，逐渐成为未来光电融合的主要技术方案[9-11]。以此为契机，集成化光纤陀螺逐步具备了相应的研究基础：利用单个集成光学芯片替代传统光纤陀螺中多个分立光学器件实现光学器件集成，干涉传感单元采用集成光波导环圈或者新一代超细径保偏光纤环圈实现微型化[12-13]，采用芯片/环圈直接耦合工艺实现光路连接以提升陀螺全温精度。

表 1 给出了导航级精度微型光纤陀螺与传统光纤陀螺综合性能对比情况。由表 1 可见，集成化光纤陀螺具有如下技术优势。

(1)高精度：集成化光纤陀螺的理论基础仍然是经典的光学 Sagnac 干涉效应，具有高精度潜力；

(2)小体积：采用集成光学芯片实现光学器件小型化，采用超细径、小弯曲半径光纤绕环实现环圈小型化，具有小体积特征；

(3)低成本：可充分发挥集成光学芯片易于批量生产的优势，大幅降低陀螺成本；

(4)高可靠：将传统的 5 个光纤熔接点用 2 个直耦点取代，光纤陀螺可靠性得以进一步提升。

表 1　集成化光纤陀螺与传统光纤陀螺性能对比

比较项目	传统光纤陀螺	集成化光纤陀螺
光器件数目	4 个	1 个
环圈最大弯曲半径	～15 mm	～5 mm
光路连接点	5 个熔接点	2 个直耦点
尺寸	70～90 mm	～40 mm
重量	150～300 g/轴	50～100 g/轴
最大功耗	＞3 W	＜2 W
成本	＞10 000 元	＜6 000 元

近年来，集成化光纤陀螺发展迅猛，逐渐成为一种极具潜力的微小型、高精度陀螺解决方案。本文重点探讨国内外集成化光纤陀螺的最新研究进展，展望其发展趋势，旨在为国内相关技术研究提供参考。

1　发展现状

集成化光纤陀螺的概念自 20 世纪 80 年代提出以来，受微加工和集成制造水平制约，大多处于理论研究层面。2010 年以来，随着光学集成技术的发展，美国的 Gener8 公司、Emcore 公司、KVH 公司、Honeywell 公司、加州大学以及俄罗斯的 Fizoptika 公司等在集成化光纤陀螺方面不断取得进展和突破，具体研究情况如下。

2011 年，美国 Gener8 公司通过与英国集成光子中心合作，采用端面耦合工艺实现了光源、耦合器、相位调制器以及探测器芯片共计 24 个分立光学器件的桥接和集成封装[14]。集成光学芯片的主要特点如下：1)采用 SiO_2 平面光波导工艺实现批量化制造与生产；2)芯片端面被设计为锥形结构，从而降低了光源/波导芯片间的耦合损耗；3)采用隔离微槽结构设计以降低光波导散射光对输出光的影响，提升芯片的整体信噪比；4)在基底上蚀刻金属化微镜以提升探测器的灵敏度。

最终，采用传统保偏光纤作为敏感部件搭建成集成化光纤陀螺，实现了地速测量，且陀螺表现出良好的抗辐射性能。不过由于采用的是分立光学器件微组装工艺，集成光学器件尺寸达到 67 mm×11 mm，仍难以满足微小型集成化光纤陀螺的应用需求。

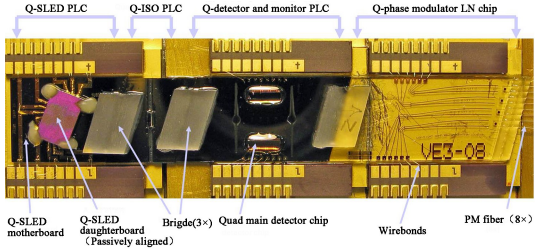
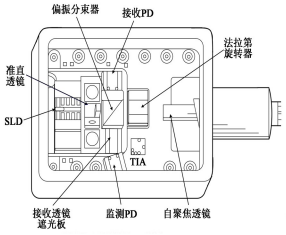


图 1　Gener8 公司研制的混合集成光学芯片

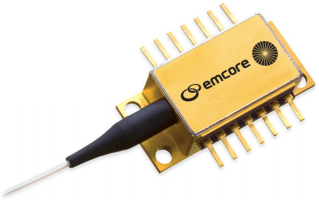
2014 年，美国 Emcore 公司研制成功一款 1 550 nm 波段的集成光学器件，将光源、探测器和耦合器实现了混合集成和可靠封装，其内部结构和封装结构分别如图 2(a)和(b)所示。器件具有高度集成、坚固耐用等技术特点，并在内部集成了监测探测器，用于对输出光功率进行检测以实现补偿控制[15]。在方案设计上，采用陶瓷基板作为基底，利用微小型分光

镜作为耦合器。光源芯片和探测器芯片分别通过焊接和粘接的方式实现与基板间的可靠连接，采用空间光透镜实现光信号传递。该方案具有设计灵活、调节方便的技术优势，但是大规模、批量化制造能力难以得到有效保证。

最终，Emcore 公司搭建成功全闭环集成化光纤陀螺产品 EG120，如图 1(c)，陀螺在 φ60 mm×21 mm 外形尺寸下实现了优于 1 (°)/h 的精度，成功应用于无人机导航、武器平台稳定控制等领域[16]。Emcore 公司在前期研究基础上，着眼于未来三轴光纤陀螺的低成本和小型化，研发成功一款三轴集成光学器件，其外形结构如图 2(d)所示，在集成光学芯片内部集成了 1 个光源、3 个耦合器以及 3 个探测器，有望大大简化三轴光纤陀螺的结构形态。



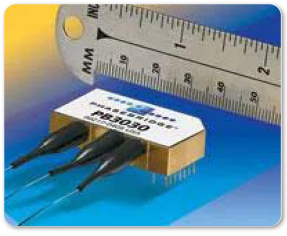
(a) 内部结构



(b) 封装结构



(c) EG120

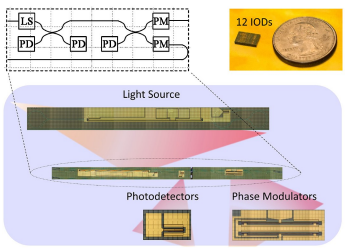


(d) 三轴集成光学芯片

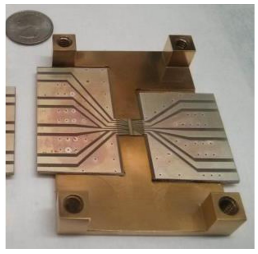
图 2 Emcore 公司研制的集成化光纤陀螺

2017 年，美国加州大学[17]在 4.5 mm^2(0.5 mm×9 mm)尺寸的硅衬底上实现了 2 个光源、2 个耦合器、2 个相位调制器以及 3 个探测器的单片式集成，如图 3 所示。主要技术特点如下：1)采用 Si 光波导作为光学芯片基材，大幅降低了尺寸，适宜于批量化制造；2)耦合器采用绝热型波导结构，以降低光传输损耗和光路散射；3)光源采用 F-P 激光器结构，通过应变量子阱和高效键合工艺提高输出光功率和光谱宽度；4)相位调制器基于硅基载流子色散效应实现高速电光调制；5)探测器芯片的耦合部分采用倾斜结构设计以降低硅波导的反射，通过对垂直量子阱区域进行优化以实现更高的探测响应度；6)硅光波导结构中设计模场转换结构以降低芯片/光纤的耦合损耗，提升光路信噪比。

加州大学采用长为 180 m、直径为 0.2 m 的保偏光纤环圈作为敏感环路，完成了集成化光纤陀螺效应的初步验证，结果显示其最小可探测速率仅为 0.53 (°)/s。研究表明，集成光学芯片上光源多模式输出光强波动、光源和探测器间光电耦合串扰等因素极大地制约了陀螺信噪比，此外基于硅基载流子色散的光相位调制非线性以及附加强度调制效应也是限制陀螺精度提升的主要因素。



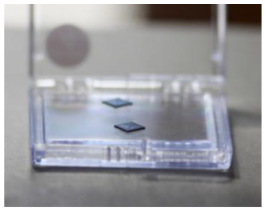
(a) 芯片结构



(b) 芯片实物

图 3 加州大学研制的硅基集成光学芯片

2020，美国 KVH 公司[18]针对无人机、车辆等应用需求开发了一型基于集成光学芯片的低成本、高可靠集成化光纤陀螺。在 1 cm^2 尺寸的 SiO_2 基集成光学芯片上集成了 2 个耦合器和 1 个起偏器(如图 4 所示)，用集成光学芯片取代陀螺产品中的 3 个分立光学器件。其主要技术特点如下：1)采用片上集成起偏器设计方案，结构上增加涂层材料，在降低器件尺寸的同时提升芯片的消光比指标；2)对 Si_3N_4 光波导端面进行抛光工艺优化，以降低传输损耗；3)对波导芯片的端面和光纤端面进行抛光处理，并保持一定的角度，从而降低芯片/光纤间的耦合损耗。



(a) 集成光学芯片



(b) 集成化 IMU

图 4 KVH 公司研制的集成光学芯片及 IMU 产品

研制的集成化光纤陀螺精度为 0.02 (°)/h，并通过了全温(−45～70 ℃)性能测试。目前，该产品已经形成了一个完整的高性能 IMU 系列，极大提升了陀螺产品的环境适应性和寿命，集成光学芯片技术已经成为该公司技术创新的典型范例。

2022 年 1 月，俄罗斯 Fizoptika 公司[19]报道了最新的微小型光纤陀螺产品 VG221，如图 5(a)，器件采用了全新的光电集成芯片技术和 40 μm 超细径光纤技术，陀螺整机外形尺寸仅为 φ33 mm×12 mm，重量为 15 g，功耗低至 0.3 W，角随机游走(ARW)为 0.02 (°)/$h^{1/2}$，可应用于无人机、机器人、战术导弹等领域。该产品的研制成功标志着光纤陀螺的外形尺寸有望降低到 30 mm 左右。2022 年 6 月，该公司报道了最新的三轴集成化光纤陀螺产品 G121，如图 5(b)，其尺寸为 52 mm×58 mm×37 mm，重量为 125 g，动态范围为 ±300 (°)/s，ARW 为 0.025 (°)/$h^{1/2}$，零偏稳定性为 3 (°)/h。该产品非常适合于无人机应用。



(a)　单轴光纤陀螺 VG221　(b)　三轴光纤陀螺 G121

图 5　Fizoptika 公司生产的集成化光纤陀螺产品

此外，加州理工学院[20]、霍尼韦尔公司[21]等也开展了集成化光纤陀螺方面的研究工作，通过不断丰富光学芯片的集成手段、提升光学芯片的集成度和性能，持续推动集成化光纤陀螺技术进步与发展。

2　关键技术分析

对于集成化光纤陀螺而言，其关键技术主要有高性能集成光学芯片设计和加工技术、微小型高对称光纤环圈绕制技术、集成光学芯片与微小型光纤环圈直接耦合技术、集成化光纤陀螺噪声分析及抑制技术。

2.1　高性能集成光学芯片设计加工技术

集成光学芯片的基本结构如图 6 所示，主要包括光源、探测器、耦合器、相位调制器等四大器件；还包括 FET 场效应管以实现电流-电压信号转变；在器件和 TEC 制冷器之间还增加了热沉，以提升热导率，通过温度控制器实现集成光学芯片的稳定温度控制；在器件/器件连接上，通过微光波导取代传统光纤实现低损耗光互联，在降低器件尺寸的同时确保其性能不受影响。

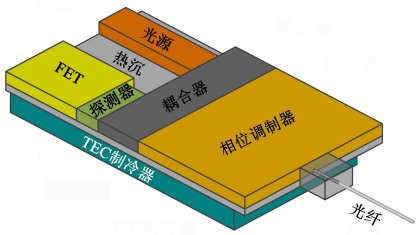


图 6　集成光学芯片基本结构

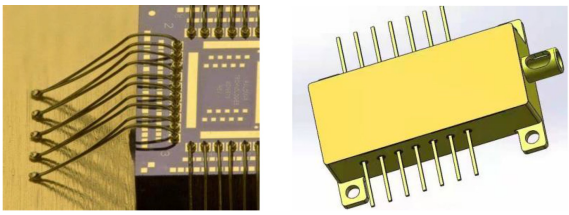
集成化光纤陀螺性能指标与集成光学芯片的性能存在直接依赖关系，如集成光学芯片的输出光功率、光谱宽度、探测响应度、暗电流以及芯片集成过程中引入的光电串扰将会制约陀螺精度的提升；集成光学芯片的光波长漂移将会劣化陀螺的标度因数，集成化光纤陀螺对集成光学芯片的具体牵引性指标如表 2 所示。集成光学芯片的各项性能由设计及加工工艺所保证，因此集成光学芯片设计加工技术是集成化光纤陀螺研究的核心技术。

表 2　集成化光纤陀螺对集成光学芯片的牵引性指标

性能指标	参数
输出光功率/μW	单路，>400
光波长/nm	1 310
光谱宽度/nm	>30
全温功率稳定性	<5%
全温波长漂移/ppm	<100
探测响应率/(A/W)	>0.8
探测暗电流/nA	<10
探测噪声电压/mV	<1
耦合器分光比	优于(50±2)：(50±2)
耦合输出消光比/dB	>30
半波电压/V	<4
残余强度调制	<1/1 000

集成光学芯片从具体结构上主要有多器件系统级封装方案和单片式集成方案。在系统级封装方案中，光源、探测器等芯片经过平行开发和生产，随后采用芯片/芯片端面耦合集成为一个组合芯片。该方案实现难度低，但是加工后的芯片尺寸较大，制约了陀螺体积的降低；在单片式集成方案中，光源、探测器等芯片通过材料沉积或生长工艺形成，芯片尺寸小，适用于小型集成化光纤陀螺。但是制作光源的 InP 等有源材料无法在 Si，SiO_2 等无源材料上实现生长，而必须采用键合、端接等混合集成工艺，在此过程中不同体系材料的芯片在集成过程中存在模场失配、损耗增大、串扰增强等问题，将会严重制约集成化光纤陀螺性能。

集成光学芯片要实现陀螺应用，还需要采用稳固可靠的器件封装，需要采用引线键合方式，工艺效果如图 7 所示。键合连接后的芯片经过连通测试后用封装胶进行覆盖，防止在后续测试中造成金线断裂。此外，需要采用大尺寸管壳气密性封焊夹具设计，以保证封装可靠性，将光学芯片封装进入相应的壳体中，最终完成集成光学器件研制。



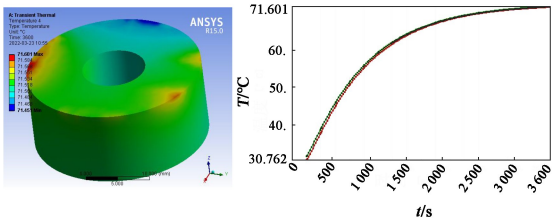
(a) 引线键合工艺 (b) 封装示意图

图 7 集成光学芯片封装结构

2.2 微小型高对称光纤环圈绕制技术

微小型高对称光纤环圈是本项目中的关键部件之一，其性能直接影响陀螺精度和环境适应性。环圈损耗与陀螺信噪比和背向散射噪声大小相关，环圈良好的对称性是确保集成化光纤陀螺温度、振动和磁场等环境适应性的前提条件，因此微小型高对称光纤环圈绕制技术是集成化光纤陀螺研究的核心技术。

图 8 给出了集成化光纤陀螺用微小型光纤环圈的温度场仿真结果，可见微小型光纤环圈的热场呈现温度高、温升快、分布不均的特点。以目前的陀螺功耗为例进行分析，微小型光纤环圈 1 h 温升高达 40 ℃以上，由于多极对称绕制方式又很难确保环圈完全沿着中心点对称，从而在温变过程中引入严重的 Shupe、偏振噪声等，劣化集成化光纤陀螺的零偏和标度因数性能。



(a) 热场仿真图 (b) 温度变化情况

图 8 微小型光纤环圈温度场仿真结果

集成化光纤陀螺用微小型光纤环圈结构以及绕环方法与传统光纤陀螺存在差异性，主要表现在以下几个方面：1)采用 60/100 μm 光纤，对排纤精度和绕环工装精度要求极高，成环技术难度大；2)光纤环圈的层数多，绕制过程中产生的微小缺陷将会制约成环质量，同时导致光纤环圈内应力增大，陀螺性能劣化；3)光纤环圈截面的宽高比非最优构型，导致温度引入的陀螺 Shupe 漂移大。针对上述瓶颈难题，需要针对微小型光纤环圈结构特点，对缠绕方法进行优化以提升环圈对称性，降低微小型光纤环圈损耗，同时关注绕环效率的提升。

2.3 集成光学芯片/光纤环圈直接耦合技术

集成化光纤陀螺的光路由集成光学芯片和微小型光纤环圈组成，光学芯片与光纤环圈间的连接质量将直接影响集成化光纤陀螺性能。传统的尾纤熔接方式会引入偏振误差，在集成化光纤陀螺全温精度方面不具优势。通过在光学芯片与光纤环圈之间采用直接耦合能够提高对轴精度，降低陀螺偏振误差，因此集成光学芯片/光纤环圈直接耦合技术是其关键技术。

直接耦合技术是实现集成化光纤陀螺高质量光路连接的关键技术，其技术难点主要体现在以下两个方面：1)集成光学芯片的截面尺寸与微小型光纤环圈的端面尺寸存在较大差异，对两者之间的耦合对准精度要求极高，主要表现在因对准引入的损耗误差和偏振误差将严重劣化集成化光纤陀螺性能；2)集成光学芯片与光纤环圈连接处产生的固化应力会劣化集成化光纤陀螺性能，主要表现在过大的固化应力将导致陀螺的高低温漂移增大。综上所述，集成光学芯片的结构和直接耦合工艺需要进行针对性的设计优化和改进，以满足集成光学芯片和光纤环圈的低损耗、高消光比直接耦合要求。

3 发展趋势

光纤陀螺历经了 40 余年发展，已经获得广泛应用，但是其 SWaP-C 难以进一步下降，已成为目前光纤陀螺进一步发展的主要限制因素。近年来，随着光学集成技术的快速发展，以 Si，Si_3N_4，$LiNbO_3$ 等为衬底的集成光学芯片逐渐获得突破，采用集成光学芯片取代传统分立光学器件有望实现除光纤环圈以外其他分立器件的混合集成，上述技术进步为集成化光纤陀螺的研制奠定了重要基础。

通过对近年来国内外集成化光纤陀螺研究现状和发展动态的梳理，我们认为集成化光纤陀螺发展趋势如下：

(1)基于系统级封装方案的集成化光纤陀螺有望在 3 年内实现系统应用。

通过采用系统级封装方案，有望研制成功包含光源、探测器、耦合器、调制器等多种功能单元为一体的集成光学芯片，实现光纤陀螺光路结构的升级换代。在这一过程中，应重点解决集成化光纤陀螺存在的串扰、温升、空间辐射等问题，严格控制光学芯片封装尺寸以满足小型集成化光纤陀螺应用需求。此外，随着 ASIC 电路集成度提升、保偏光纤细径化等技术的发展，在确保陀螺精度的同时有望进一步降低体积。预期通过 3 年时间持续攻关，有望研制成功微小型集成化光纤陀螺，在 0.05～0.1(°)/h 精度级别具有绝佳的 SWaP-C 综合性能，在无人机、机器人、自动驾驶等领域相较 MEMS 陀螺具有显著的精度优势。

(2)基于 Si 基单片式集成方案的集成化光纤陀螺是未来 5～10 年的重要发展方向。

目前，基于 SiO_2 基的集成光学芯片封装尺寸多在 20～30 mm，不仅限制了更小尺寸范围内光纤陀螺的应用，也逐渐难以满足多轴集成化光纤陀螺对小尺寸光学芯片的迫切需求。采用具有更小弯曲半径的 Si 基集成光学芯片(典型弯曲半径为 5 μm)，可大幅降低集成光学器件尺寸到 10 mm，实现集成化光纤陀螺综合性能的进一步提升。针对 $LiNbO_3$ 体材料相位调制器难以与 Si 基集成的瓶颈难题，可采用 $LiNbO_3$ 薄膜相位调制器技术，最终实现光源、探测器、耦合器和相位调制器的 Si 基单片式全集成，进一步提升集成化光纤陀螺的批量生产制造能力。

参考文献：

[1] Sanders G A, Sanders S J, Strandjord L K, et al. Fiber Optic Gyro Development at Honeywell[M]. 2019.

[2] George A P, Sanders G A. Recent Improvements in Fiber Optic Gyros at Northrop Grumman Corporation[M]. 2019.

[3] Bacurau R M, Alex D, Schlischting M W, et al. Two-level and two-period modulation for closed-loop interferometric fiber optic gyroscopes[J]. Opt. Lett., 2018, 43(11): 2652-2655.

[4] Shang K, Lei M, Xiang Q. et al. Near-navigation-grade interferometric fiber optic gyroscope with an integrated optical chip[J]. Chinese Opt. Lett., 2020, 18(12): 120601.

[5] Bergh R A, Arnesen L, Herdman C. Fiber optic gyro development at Fibernetics[C]// SPIE Commercial+Scientific Sensing & Imaging, 2016: 98520E.

[6] Khial P P, White A D, Hajimiri A. Nanophotonic optical gyroscope with reciprocal sensitivity enhancement[J]. Nature Photonics, 2018(12): 671-675.

[7] Shang K, Lei M, Li H, et al. Ultra-small interferometric fiber optic gyroscope with an integrated optical chip[J]. Chinese Opt. Lett., 2022, 20(4): 1-5.

[8] Shang K, Lei M, Xiang Q, et al. Near-navigation-grade interferometric fiber optic gyroscope with an integrated optical chip[J]. Chinese Opt. Lett., 2020, 18(12): 7-10.

[9] Yu L J, Yuan C Z, Qi R D, et al. Hybrid waveguide scheme for silicon-based quantum photonic circuits with quantum light sources[J]. Photon. Research, 2020, 8(3): 17-27.

[10] Ryan B J, Diroll B T, Guo Y, et al. Silicon nanosheets as candidates for silicon-based optoelectronics[J]. ECS Trans., 2021, 102(1): 3-17.

[11] Xu H, Dai D, Shi Y. Fabrication-friendly on-chip silicon polarizer based on polarization-selective corner mirrors[J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 2021, 33(99): 652-655.

[12] Cai H, Yu F, Liao M S, et al. Thin-diameter polarization maintaining hollow-core photonic bandgap fiber for fiber optic gyroscope[J]. Optical Fiber Technol., 2020, 55: 102141.

[13] Luo W, Li Z, Ke Y, et al. Small-diameter polarization maintaining optical fiber: BritainsEP3141937A4[P]. 2018-08-01.

[14] William K. Hybrid integration of fiber optic gyroscopes operating in harsh environment[J]. Proc. of SPIE, 2011: 81640Q-1.

[15] Logan R T, Wong K. Compact fiber optic gyroscope: United States, US8773665B1[P], 2014-07-08.

[16] http://emcore. com/product-category/navigation-inertial-sensing [DB/OL].

[17] Minh A T, Tin K, Jared C. et al. Integrated optical driver for interferometric optical gyroscopes[J]. Opt. Express, 2017, 25(4): 3826-3840.

[18] 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 Inter. Symp. on Inertial Sensors and Systems (INERTIAL), 2019: 1-2.

[19] https://www. unmannedsystemstechnology. com/company/fizoptika/fiber-optic-gyro-g121[DB/OL].

[20] Lai Y H, Suh M G, Lu Y K, et al. Earth rotation measured by a chip-scale ring laser gyroscope[J]. Nature Photon., 2020, 14(6): 1-5.

[21] Sanders G A, Lee K, Williams W. Improvement to signal processing and component minaturization of compact resonator fiber optic gyroscope[C]// 2018 DGON Inertial Sensors and Systems(ISS), 2018.

作者简介：

雷　明(1983—)，男，湖北省松滋市人，博士，高级工程师，主要研究方向为高精度、小型化光学陀螺技术。