

谐振式集成光学陀螺的研究与进展

肖志松^{1,2,3*}, 张浩¹, 周阳¹, 蔡微², 李文秀², 常晓阳², 蒋硕², 黄安平²¹北京航空航天大学前沿科学技术创新研究院, 北京 100191;²北京航空航天大学物理学院, 北京 102206;³北京量子信息科学研究院, 北京 100193

摘要 陀螺仪作为惯性导航的关键部件,决定了飞行器、运载机械和无人系统等导航定位的精度和姿态控制的稳定性。在兼顾精度的同时,小体积可集成陀螺仪的需求越来越迫切,微纳集成谐振式光学陀螺有望同时满足可集成与高精度等应用需求。本文结合国内外近年来微纳集成光学陀螺研究的新进展,综述了谐振式集成光学陀螺的研究现状、瓶颈问题和未来发展趋势;基于新材料、新结构和新物理效应等可能的解决途径,重点阐述了光增益补偿、色散调控、非厄米奇异点对谐振式集成光学陀螺敏感性能的影响;最后,对谐振式集成光学陀螺的未来发展趋势进行了展望。

关键词 物理光学; 光学陀螺; 光学微腔; 色散关系; 光增益与损耗; 非厄米奇异点

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL202249.1906001

1 引言

以激光陀螺和光纤陀螺为代表的光学陀螺具有优异的性能,是现今应用最广泛的陀螺仪。作为惯性导航的关键器件,陀螺仪是决定下一代远程空间飞行任务成功与否的关键,被誉为飞行控制的“大脑”。美国国家航空航天局(NASA)喷气推进实验室的研究人员得出结论:飞行器的姿态信息是完成着陆、对接等飞行任务的关键因素,即使是现今性能最好的陀螺仪也存在很大概率导致飞行任务失败^[1]。另外,所有的航天器对重量和体积都有非常严格的要求,例如:对于小型试验卫星来说,须将惯性导航系统的质量控制在 3 kg 以内,且其体积越小越好。目前,民用无人驾驶领域(汽车、船、飞行器等)对高精度陀螺仪的需求十分迫切,高性能陀螺仪可以确保无人驾驶的安全性。2021 年前瞻产业研究院发布的《2022—2027 年中国无人驾驶汽车行业发展前景预测与投资战略规划分析报告》显示,全球无人驾驶汽车市场规模已达 273 亿美元,预计 2035 年全球无人驾驶汽车销量将达到 2100 万辆^[2]。

随着未来市场对惯性传感系统需求的不断增长,微纳集成光学陀螺技术有望成为下一代光学陀螺的首选。微纳集成光学陀螺不仅可用于航天器的姿态控

制,还可用于自动驾驶车辆的导航系统,为自动驾驶提供安全保障,弥补了全球导航卫星系统易受障碍物遮挡、激光陀螺和光纤陀螺重量体积过大、微机电陀螺精度不高的劣势。谐振式微纳光学陀螺可以实现全光电子集成(即:将不同的分离器件包括光源、调制器、谐振腔、探测器等集成在同一芯片上),从而减小器件的体积和重量,实现规模化生产。2015 年,美国国防部高级研究计划局(DARPA)提出了“稳定型精确惯性制导弹药”计划,拟研制具有低成本、小尺寸、轻质量和低功耗特性的先进惯性敏感器件,其中微纳集成光学陀螺是该计划重点支持的惯性器件。同年,NASA 公开了两项小型化高精度光学陀螺研制计划,其最终目标是研制封装体积小于 10 cm³、质量小于 50 g、零偏稳定性可达 0.05 (°)/h 的光学陀螺^[3]。2018 年,美国加州理工大学的研究人员在表面积为 2 mm² 的硅片上研制出了当今世界上最小的陀螺仪,该陀螺仪的角度随机游走为 650 (°)/√h^[4]。2019 年,美国 KVH 公司研制出了角度随机游走为 0.0097 (°)/√h、直径为 4.57 cm 的半集成光纤陀螺^[5]。北京航空航天大学研究小组(以下简称“北航研究小组”)的研究范围已从最初光通信领域的光纤放大器发展到光波导放大器,并拓展到导航定位领域的谐振式集成光学陀螺,主要聚焦于光学陀螺的集成化与高精度等方面^[6]。

收稿日期: 2022-06-06; 修回日期: 2022-07-14; 录用日期: 2022-08-02

基金项目: 国家国际科技合作专项项目(2014DFA52000)、国家自然科学基金(61975005, 11574021, 11804017)、北京量子信息科学研究院面上课题(Y18G28)

通信作者: *zsxiao@buaa.edu.cn

微纳光学陀螺是最具潜力的可实现片上集成的低成本高精度陀螺,但其需要解决的关键问题是:微纳尺度下的闭合光路面积过小,导致陀螺灵敏度随之大幅降低。光学陀螺旋转角速度的测量是基于 Sagnac 效应进行的^[7],即旋转角速度导致顺时针和逆时针光波的频率不再简并,利用两束光的光程差来传感旋转角速度。干涉式光学陀螺将顺时针和逆时针的光程差转化成相位差进行测量,典型的光纤陀螺通过增加光纤线圈的长度来增加累积的相位差,但这种方式不利于光纤陀螺的小型化和集成化。光学谐振腔可使光波在微腔内循环振荡较长时间,用谐振腔替代光纤线圈的谐振式光学陀螺,是最可能实现高精度微纳集成的光学陀螺,其探测旋转导致的正反两方向光束频差信号的能力直接决定了光学陀螺的灵敏度。增加谐振式陀螺仪的闭合光路面积可以直接增强其旋转角速度敏感性,但这种方法对于空间狭小宝贵的飞行器来说显然是不可行的。另一种传统的提升陀螺灵敏度的方法是增加测量的积分时间;然而,在足够长的积分时间内,高阶噪声源将占主导地位,这会导致偏置不稳定、随机游走和漂移等,从而降低陀螺的测量极限精度。可见,通过增加闭合光路面积和测量时间来提高陀螺灵敏度的方法都存在一定限制,实现高精度谐振式集成光学陀螺亟需探索新原理和新技术。需要指出的是,本文所述的灵敏度是指陀螺的响应度,即输入量引起输出量的变化。

本文重点介绍了光增益型、色散型和非厄米光学陀螺的研究进展,并对谐振式集成光学陀螺的发展进行了展望。

2 光增益型光学陀螺

目前依靠微电子加工工艺制备的集成光波导在传输损耗上还无法与石英光纤相媲美,所以,制备可集成的超低损耗光波导材料成为集成光电子器件领域追求的目标。美国 UCSB 大学的 Bowers 团队^[8]研究了超低传输损耗的 Si_3N_4 波导,其传输损耗降至 0.1 dB/m。高品质因子(Q)谐振腔的线宽更窄,有利于实现高精度微纳光学陀螺,而超低损耗材料是制备高 Q 值谐振腔的基础。具有超高 Q 值($>10^9$)晶体 CaF_2 谐振腔的微纳光学陀螺已被美国硅谷的 OEwaves 公司报道,其角度随机游走为 0.02 ($^\circ$)/ $\sqrt{\text{h}}$ 、零偏稳定性可达 3 ($^\circ$)/h^[9]。2020 年,美国加州理工大学的 Vahala 研究小组^[10]在直径为 36 mm、Q 值为 10^8 的 SiO_2 微盘腔中实现了可测地球自转的陀螺,其零偏稳定性可达 3.6 ($^\circ$)/h。2021 年,英国国家物理研究所的 Silver 等^[11]在直径为 2.8 mm 的高 Q 值($\approx 10^8$)微腔中利用光学克尔效应增强 Sagnac 效应,测量到了 2 ($^\circ$)/s 的旋转响应信号。谐振腔 Q 值在时间尺度上表征了微腔对光场的束缚程度,高 Q 值对应着谐振腔模式的窄线宽和低损耗,即腔内长的光子寿命,所以高 Q 值光

学微腔是实现高性能传感的首要保障。

受加工工艺的限制,无源光波导在传输损耗方面目前还无法满足高精度微纳光学陀螺的要求。为解决这个问题,研究人员最初借鉴了激光陀螺的思想,在微谐振腔中形成两束(顺时针和逆时针)激光将其变成激光腔;另一种方案是利用有源光波导中产生的光增益来补偿谐振腔中的损耗,该方案仅仅是进行光放大并不产生激光。下面将介绍几种典型的有源谐振腔的实现方式,包括利用半导体 III-V 族材料、受激布里渊散射、受激拉曼散射、稀土离子掺杂、表面等离子激元等实现有源谐振腔,最后分析讨论光增益型谐振陀螺的发展及面临的问题。

2.1 半导体环形激光器

集成的半导体环形激光器与激光陀螺类似,在激光器内部激发两个共振模式,利用干涉技术测量旋转引起的频移。电泵浦集成环形激光器通过 III-V 族半导体技术实现。直接带隙 III-V 族半导体材料因为 PN 结中载流子的复合发光而具有较高的发光效率。早在 1980 年人们就研制出了电泵浦的半导体环形激光器(SRLs),其有源区采用 AlGaAs/GaAs 双异质结构,但多纵模和高阈值电流限制了其在陀螺中的进一步应用^[12-13]。高性能光学陀螺要求环形半导体激光器的线宽小于 1 MHz,直径至少在毫米量级^[14],虽然近几十年来已经设计了大量的半导体环形激光器,但只有少数器件的腔总长度约为几毫米,适用于有源集成光学陀螺。1990 年,直径为 3 mm 的半导体环形激光器被制备出来^[15],其发射波长为 1540 nm,线宽为 900 kHz。2003 年,Sorel 等^[16]将采用金属有机化学气相沉积生长的双量子阱结构作为有源区,制备了半径为 1 mm 的性能优良的半导体环形激光器;该激光器的阈值电流随着刻蚀深度的降低而降低,当波导刻蚀深度为 1050 nm 时,阈值电流约为 270 mA。2001 年,Armenise 等^[17]模拟并设计和工作波长为 845 nm、基于多量子阱半导体环形激光器的全集成有源光学陀螺仪,其结构如图 1 所示。电光调制器在激光腔产生的两个方向光波中引入 $\pi/2$ 的偏置相移,两束光信号在 Y 波导输出端干涉并被光电探测器检测。假设集成陀螺的最小可探测角速率受量子噪声的限制,那么其在无损条件下的测量极限精度约为 0.01 ($^\circ$)/h。

与电泵浦环形激光器相比,光泵浦环形激光器需要外部的泵浦光源,不适用于集成光学陀螺。但是,光泵浦环形激光器在光束线宽和发射功率方面表现优异,具有在谐振式陀螺系统中应用的潜力,且可采用不同的材料制备,如磷化铟、硅、聚合物和铈酸锂等。

2.2 受激辐射光散射放大

受激拉曼散射和受激布里渊散射属于受激辐射光散射,是一种非线性光学效应。无论是利用受激拉曼散射还是利用受激布里渊散射,都可较灵活地移动散

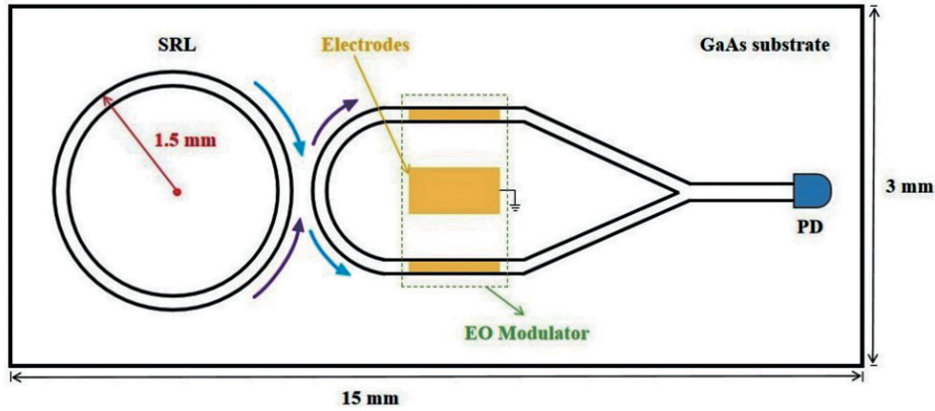


图 1 全集成有源光学陀螺示意图^[17]

Fig. 1 Schematic of integrated active optical gyroscope^[17]

射光的频率。受激拉曼散射是强激光场与原子中的电子、分子中的振动或晶体中的晶格耦合产生的非线性散射,而布里渊散射是光子与声子相互作用导致的非线性散射,因此,拉曼散射频移要远大于布里渊散射频移,可以降低泵浦光对信号的影响。

2007 年,Rong 等^[18]报道了腔长为 30 mm 的光泵浦硅基拉曼环形激光器(图 2 为谐振腔结构截面示意图),其泵浦波长为 1550 nm,激发波长为 1686 nm,线宽为 100 kHz。2011 年,北航研究小组^[19]提出了一种受激拉曼增益的硅基耦合谐振环结构构建方法,在硅基脊形波导左右两侧相隔 7~8 μm 处,分别设置 p+ 和 n+ 掺杂区域(用以形成 PN 结),并向掺杂区域上方电极施加反向电压。PN 结可以抑制由双光子吸收产生的自由载流子对增益光的吸收效应,使受激拉曼过程持续进行,从而产生光增益。此外,利用受激布里渊散射效应在谐振腔内产生两束激光形成受激布里渊激光陀螺的研究也取得了进展。2017 年,美国加州理工大学的 Vahala 课题组^[20]在 Q 值为 10⁸、直径为 36 mm 的 SiO₂ 微盘中实现了受激布里渊激光陀螺,其灵敏度与同尺寸光学陀螺相比提升了 40 倍,角度随机游走达到了 15 (°)/√h。2020 年,Vahala 课题组^[10]再次利用受激布里渊陀螺方案实现了对地球自转角速率的探测,角度随机游走在 0.068 (°)/√h,但这种片上的 SiO₂ 微盘腔至今还无法实现集成化。

2.3 稀土离子掺杂光放大

将稀土离子作为增益介质掺入光学谐振腔或光波导材料中,以合适的泵浦波长激发,使稀土离子能级实现粒子数反转,产生受激辐射,进而获得光增益^[21]。稀土离子,如 Er³⁺、Ho³⁺、Nd³⁺、Sm³⁺、Tm³⁺、Yb³⁺ 等,受激辐射的波长可以覆盖 0.5~3.5 μm 波段。Er³⁺ 受激辐射的波长在光通信低损耗窗口(1.55 μm)附近,因此其在光通信等相关领域被广泛应用。Er³⁺ 掺杂光纤放大器的应用已经很成熟,而且很多科研团队对掺 Er³⁺ 的光波导放大器、激光器^[22-24]、滤波器^[25]进行了大量研究,为在集成光学陀螺谐振腔中掺杂稀土离子从而引入光增益提供了很好的借鉴。

2007 年,Winick 等^[26]采用离子交换方法在掺钕玻璃中制备了补偿传输损耗的有源集成光学环形谐振腔,泵浦增益介质时,1.6 cm 直径环形谐振腔的精细度从 11 提高到了 250。北航研究小组^[27]提出了一种稀土掺杂玻璃基三维有源耦合谐振环结构的构建方法,利用飞秒激光在块状稀土离子掺杂玻璃中刻写耦合谐振环波导结构,并构建三轴微纳集成光学陀螺,以测量三个方向角速度的大小。提供光增益的稀土离子可有效补偿结构中传输光的损耗,增强陀螺的信噪比。随后,北航研究小组^[28]又提出了一种三维垂直耦合谐振环结构,如图 3 所示,信号光从底部的直波导输入,然后耦合进入一系列垂直的耦合谐振环结构,最后在侧向耦合进输出直波导。值得注意的是,该堆叠方式能够保证所有谐振环累积的 Sagnac 相移方向一致,从而增大有效面积。同时,整个结构都是利用飞秒激光直接刻写整块掺杂磷酸盐的玻璃得到的,光增益可以补偿大部分传输损耗,但不可避免地引入了自发辐射噪声。基于这种耦合谐振腔结构的特殊性,北航研究小组在计算中结合了当前实际的工艺水平,并考虑了谐振腔之间的结构偏差对灵敏度的影响。计算结果表明,当泵浦功率为 50 mW 时,测量极限精度可达 5.3 (°)/h。

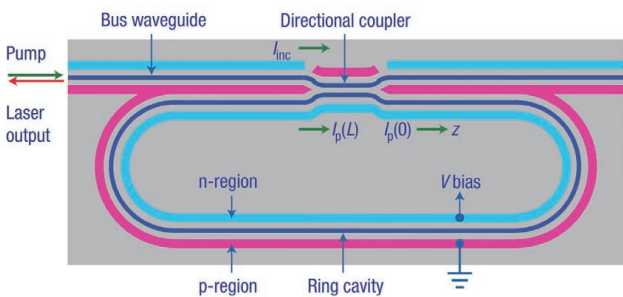


图 2 受激拉曼散射光增益机制的谐振腔结构截面示意图^[18]

Fig. 2 Section diagram of resonator structure for gain mechanism of stimulated Raman scattering^[18]

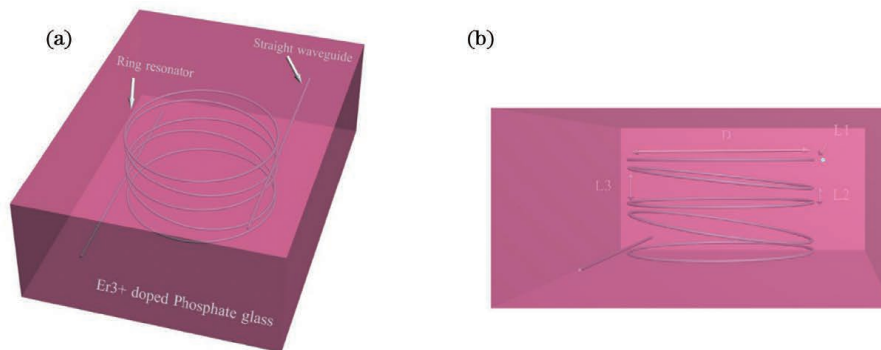


图 3 三维垂直耦合谐振环结构^[28]。(a)俯视图;(b)侧视图

Fig. 3 Structure of three-dimensional vertically coupled resonator^[28]. (a) Top view; (b) side view

近年来也出现了一些颇具潜力的有源集成光学陀螺的仿真设计和实验方案,如:2014年,Zhang等^[29-30]提出基于长程表面等离子激元硅基波导谐振腔的集成光学陀螺,该陀螺采用垂直光泵浦 Er^{3+} 掺杂的磷酸盐玻璃补偿波导传输损耗并减小泵浦噪声,同时由于表面等离子激元只能传输 TM 偏振光,故而避免了偏振串扰噪声;理论计算表明,该陀螺的测量极限精度可达 $0.01 (^{\circ})/\text{h}$ 。

光增益型谐振陀螺的发展主要面临以下问题:

1)有源腔中的模式竞争导致两束光非互易,双向操作激光的建立比较困难;2)陀螺闭锁效应,即加工制备的不光滑波导侧壁导致背向散射,使得顺时针和逆时针光束相互交叉耦合,导致陀螺在低转速下没有频差输出信号;3)光泵浦需引入泵浦光源,系统较为复杂,而电泵浦比较紧凑,更适合整片全光集成发展。

需要指出的是,引入光增益会不可避免地带来噪声,包括自发辐射噪声、剩余泵浦噪声和热噪声等,这些噪声都将影响陀螺的测量极限精度^[31]。无源光学陀螺的测量极限精度主要受限于散粒噪声,而有源光学陀螺的测量极限精度主要受限于自发辐射噪声。即使制备出可媲美石英光纤损耗量级的光波导,在相同的尺寸下,陀螺的灵敏度也只能达到光纤陀螺的水平。同时,无论是低损耗光波导材料还是光增益谐振腔的制备,都还有很多工艺和技术方面的瓶颈问题,有待研究人员去攻克。

3 色散型光学陀螺

制备超低损耗的光波导和引入光增益补偿损耗只是保证陀螺高信噪比的基本要求,调控光增益亦可产生诸多新奇的物理效应,可利用其探索新陀螺原理的传感技术,并研制超高性能的陀螺仪。研究色散关系对光学陀螺灵敏度的影响一度被认为是实现超高精度陀螺的重要突破点^[32]。色散关系解析式中复折射率的实部和虚部均为光波频率的函数,实部与频率之间的关系代表色散关系,虚部的正负分别代表增益或损耗,实部和虚部之间存在 Kramers-Kronig 关系,所以通过调控增益可以改变色散关系。

色散关系会直接影响光的传播速度,而光的传播速度有相速度和群速度之分,群速度由折射率实部对频率的导数决定,所以物理系统中群速度的极值通常伴随着材料的共振响应。调控光波的群速度可使其加速(减慢)为快(慢)光。慢光对应着正常色散,快光对应着反常色散。经过大量的理论和实验研究,研究人员发现了许多调控光群速度的方法,主要分为两大类:材料色散和结构色散。

3.1 材料色散

在碱金属气中利用双频拉曼泵浦实现双峰光增益是早期产生快光的主要方式^[33],目前开展这方面研究的主要有美国西北大学的 Shahriar 研究小组和 NASA 马歇尔太空飞行中心的 Smith 研究小组,他们分别从事利用有源和无源色散腔提高陀螺灵敏度的研究。Shahriar 研究小组^[34-37]在实验中将两个铷原子气泡中的一个作为激光的增益介质,并用另一个产生反常色散;测试结果显示,快光陀螺的响应度相比无色散空腔情况下提高了 190 倍,但与预期的 6 个数量级的增强尚有差距。这是因为除了增益介质的正常色散会抵消反常色散使其难以观察外,色散和增益介质引入的量子噪声对灵敏度的影响也是不可忽视的。Smith 研究小组^[38-39]将一个铷原子泡放入无源谐振腔中作为吸收介质产生反常色散,但未报道快光陀螺灵敏度的实验数据。2012 年,美国 NASA 的“改变游戏规则”计划支持了 5 个航天技术项目,其中的一个项目就是基于反常色散的快光陀螺^[40]。2016 年 4 月,NASA 又资助了快光陀螺的二期计划——快光增强的有源陀螺、加速度计和光纤传感器(Fast Light Enhanced Active Gyroscopes, Accelerometers and Fiber-Optic Sensors)。

利用原子气产生快光可以增强陀螺的灵敏度,但泵浦光带来的非线性光学过程也会产生诸多不利因素,例如,需要精确控制谐振腔长和激光参数等。在有源和无源快光腔中,原子气介质的饱和和吸收和光泵浦会改变共振谱线的线型,降低信噪比和灵敏度。即使完全避免了上述效应,原子气中的原子跃迁也会受温度波动的影响,需要先进的控温技术将温度噪声降到

最低。更重要的是,利用原子跃迁的方式极大地限制了工作波长(铷原子气色散谐振腔的工作波长为 780 nm 或 795 nm),从而限制了陀螺的广泛应用。通常来讲,改变谐振式陀螺(如激光陀螺)的工作波长是极其复杂的,正如多年来制造厂商不断对激光陀螺的性能进行完善和改进,但主要研究的仍然是工作波长为 632 nm 的氦氖激光陀螺。

3.2 结构色散

结构色散利用结构共振实现色散调控,将耦合谐振腔等效成简谐振子模型。耦合谐振腔是由 Yariv 提出的一种周期结构,通过设计结构参数可使光波在谐振波长附近产生强烈的色散效应^[41],即:不需要利用色散介质仅通过调节结构参数改变色散关系。因此,设计和改变耦合谐振腔的结构参数(如耦合系数、损耗系数和腔长等)可以调控光的群速度。

因为在多环耦合谐振腔结构中累积的相位与群折射率成正比,所以研究人员最初提出将耦合谐振腔光波导结构(CROW)和边耦合谐振腔结构(SCISSOR)作为陀螺谐振腔来增强陀螺累积的相位信号。2006 年, Scheuer 等^[42]首先提出利用高精度耦合谐振腔引入的慢光效应增强陀螺的灵敏度,但他们在分析时并未考虑偏置相位,且慢光并非增强陀螺灵敏度的根本原因,其根本原因是谐振腔的高精度度。2009 年,北航研究小组^[43]提出了耦合谐振腔色散陀螺结构(如图 4 所示),通过调控正常色散关系中的群折射率可以产生慢光和陀螺灵敏度的变化。两者并非“因果”而是皆为“果”,即慢光不是陀螺灵敏度增强的原因,都是色散关系变化带来的结果。不考虑损耗时,无源谐振腔结构参数和耦合系数都可用于调控陀螺的灵敏度,而慢光也会自然发生。2014 年,美国斯蒂文森大学的 Search 研究小组^[44]分析了传输损耗在 CROW 陀螺中的影响,并指出:在现阶段的波导制作工艺(损耗大于 0.1 dB/cm)下,相同周长的单环谐振腔结构陀螺的性能要优于 CROW 陀螺,但当传输损耗降到 0.001 dB/cm 以下时,随着谐振环个数增加,CROW 陀螺的性能要

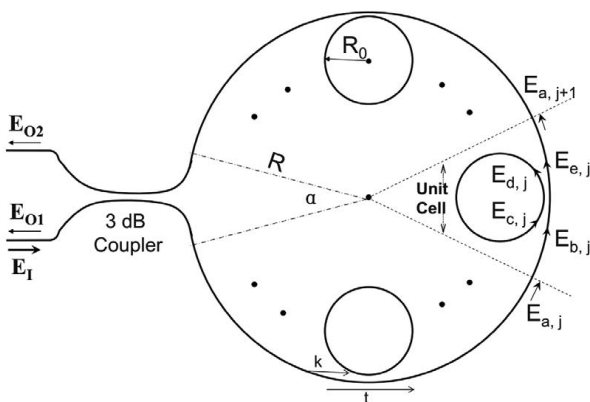


图 4 色散陀螺耦合谐振腔结构^[43]

Fig. 4 Schematic of circle-coupled resonators for dispersion gyroscope^[43]

优于单环谐振腔结构陀螺。目前,研究人员对于慢光是否会增强陀螺的灵敏度还存在着争议。Stanford 大学的 Digonnet 研究小组^[45-46]比较了各类多环耦合谐振腔结构,并认为在对比陀螺结构是否会提升其灵敏度时,需要遵循以下对比原则才是客观公平且有意义的:

1) 两个陀螺谐振腔的有效面积必须相同。因为 Sagnac 相移正比于光学路径包围的闭合面积,所以将单环结构与多环结构 CROW 陀螺进行对比时,它们的总光学有效面积要保证相同。

2) 多环耦合谐振腔结构的光学陀螺输出的有效相移以光功率的形式被探测,因此,陀螺的标度因数应以旋转导致的功率变化为准,而不是以旋转导致的相位变化为准。

3) 设计陀螺结构模型必须要考虑传输损耗,忽略传输损耗将导致结论没有物理意义并且不符合逻辑。材料损耗会限制陀螺的灵敏度,并且在耦合谐振腔结构中,损耗和色散是密切相关的,不可能单纯地增加群延迟而不增加损耗。如果通过引入增益的方式来补偿传输损耗,那么增益引入的噪声源,例如自发辐射噪声、热噪声等,必须要考虑。

4) 在对比前,谐振腔的设计参数和陀螺实验中可调的参数都要进行优化。在谐振式光学陀螺或者 CROW 陀螺中,必须使用优化后的耦合系数和偏置相位。如果随意选取耦合系数或者在没有相位偏置的情况下对比两个陀螺,对比的结果将是不合理的,不能决定孰优孰劣。

5) 将光波导或光纤长度相同的谐振式陀螺与光纤陀螺进行对比是没有意义的,因为在高 Q 值谐振腔中多次循环会导致谐振式光学陀螺比相同长度的光纤陀螺灵敏度更高。灵敏度对比要在谐振式光学陀螺之间进行。

在相同的旋转角速度下,快光陀螺可产生更大的谐振频移。北航研究小组设计了芯片级快光陀螺结构^[47],如图 5 所示,用掺杂 Er^{3+} 的铌酸锂薄膜制备芯片上的激光谐振腔,并用马赫-曾德尔(MZI)无源谐振腔结构耦合激光腔。通过调节 MZI 的相位来调制整个激光腔的色散关系从而提高陀螺的灵敏度,是一种连续调节色散关系的有效手段。

北航研究小组研究后发现,虽然反常色散增大了旋转导致的陀螺谐振峰频移,但反常色散导致谐振线宽的展宽在一定程度上抵消其增强的谐振频差^[48-50]。由式(1)可看出:在正常色散下($n_g > 1$)谐振线宽将变窄,而在反常色散下($n_g < 1$)谐振线宽将展宽(如图 6 所示)。

$$\Delta\omega_{1/2} = \frac{\Delta\omega_{1/2}^0}{1 + \frac{l}{L}(n_g - 1)}, \quad (1)$$

式中: l 为色散介质的长度; L 为谐振腔长; n_g 为群折

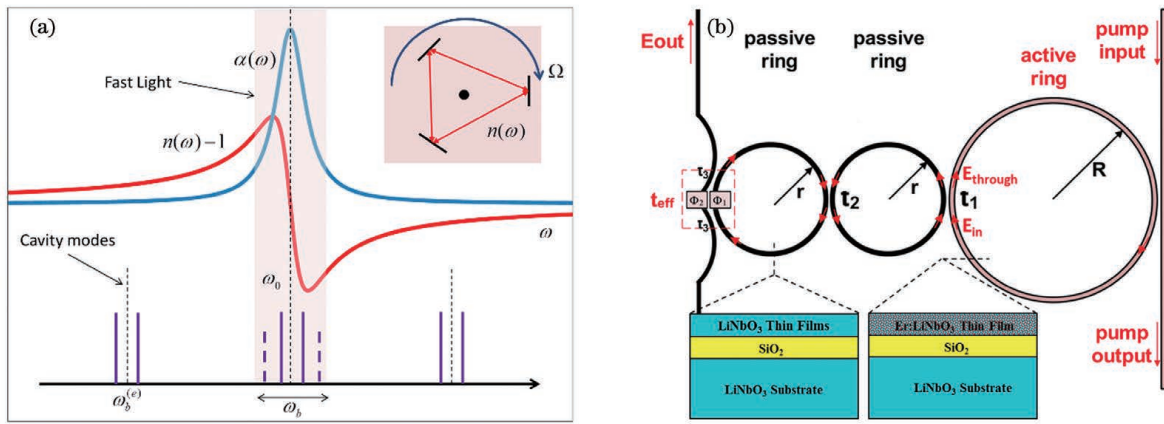


图 5 快光陀螺原理示意及结构设计^[47]。(a) 快光增强陀螺拍频的原理；(b) 芯片级快光陀螺的结构
Fig. 5 Principle and structure design of fast optical gyroscope^[47]. (a) Principle of fast light enhancing beat frequency of gyroscope; (b) structure of on chip fast light gyroscope

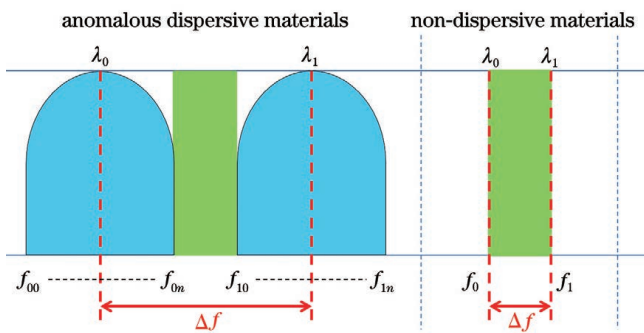


图 6 在反常色散条件下谐振线宽展宽示意图
Fig. 6 Schematic of resonant linewidth broadening under abnormal dispersion condition

射率； $\Delta\omega_{1/2}^0$ 为无色散谐振线宽； $\Delta\omega_{1/2}$ 为色散腔谐振线宽。对于快光陀螺来说，除了吸收峰对应的反常色散难以观察到以外，反常色散伴随的谐振线宽的展宽也是无法避免的。另外，由于制备工艺等原因，陀螺谐

振腔内壁的缺陷会导致背向散射光耦合，即背向散射噪声使谐振线宽展宽，从而导致陀螺在低旋转速度下顺时针和逆时针的谐振模式难以劈裂，即发生闭锁效应（也称为“死区”）。

无论是结构原因还是材料原因导致的反常色散，都会使谐振腔线宽展宽并降低陀螺的灵敏度。北航研究小组将色散介质放入狭缝谐振腔（如图 7 所示）中，利用谐振腔的线宽展宽来测量陀螺的旋转角速度。狭缝腔镜中注入了铷原子气，通过调节泵浦光使其处于正常色散条件，以增强腔镜的背向散射响应，使顺时针和逆时针两束光的交叉耦合增加，进而模式被展宽。这种自参考的测量方式不依赖于高 Q 值微腔，而且对温度的波动和探针光的频率波动也不敏感，可以消除谐振式陀螺的闭锁效应。与相同条件下传统谐振式陀螺的测量方式相比，该方式的测量极限精度提升了大约 5 个数量级^[51]。

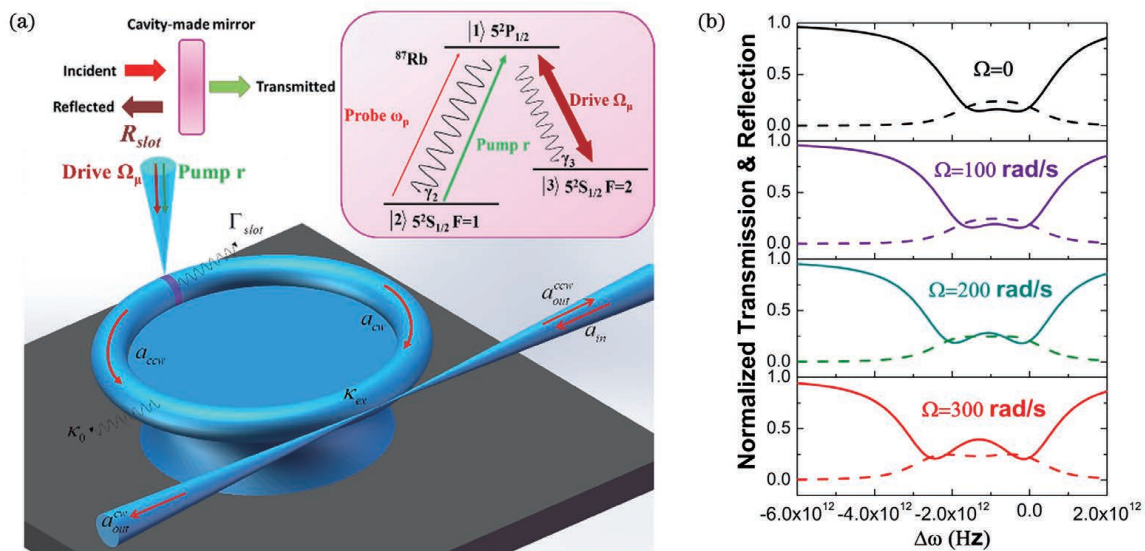


图 7 利用模式展宽测量旋转角速度^[51]。(a) 微腔耦合色散狭缝腔镜结构示意图；(b) 不同旋转角速度下的透射和反射谱线展宽
Fig. 7 Detecting mode broadening induced by rotation rate^[51]. (a) Schematic of microresonator coupled with dispersion slot cavity; (b) transmission and reflection spectra broadened under different rotation rates

3.3 白光腔

由式(1)可知,当谐振腔中充满色散介质($l=L$)且群折射率 $n_g=0$ 时,色散腔线宽无穷大,即所有频率的单频光都可在谐振腔中振荡。处于这个临界点的谐振腔被命名为“白光腔”^[52]。相比于传统的光学谐振腔,白光腔具有更宽的探测带宽和更高的相位探测精度。但是,在经典噪声可以忽略的情况下,白光腔对相位或谐振频移的测量极限精度受限于光场的量子噪声^[39]。当电磁场的真空涨落进入白光腔并与入射到腔内的激光场相叠加时,就会形成散粒噪声,从而使白光腔有一个标准的量子测量极限精度^[53]。因此,降低量子噪声对白光腔测量极限精度的影响是应用白光腔的关键。

目前,国际上这一前沿领域的研究小组大多是基于经典光场进行研究的,关于量子噪声对白光腔测量极限精度的影响,尚无详细的理论研究和实验数据的公开报道,也没有抑制白光腔量子噪声方法的相关报道。利用白光腔增强测量极限精度需要解决的关键问题有:1)反常色散展宽谐振线宽;2)白光腔量子噪声来源;3)噪声对测量极限精度的影响。根据量子力学中的海森堡不确定关系,量子噪声不可能被完全消除,但采用非经典态光场(例如 Fock 态、N00N 态与压缩态)等技术手段可以有效抑制谐振腔中的散粒噪声,从而突破谐振腔的标准量子测量极限精度^[54]。其中,光场压缩态一个正交分量的涨落低于真空噪声,另一个正交分量的涨落高于真空噪声,将待测量的信号加载在低于真空噪声的正交分量上可以显著提升测量极限精度。近期,本课题组尝试将压缩真空场引入色散腔来降低量子噪声,分析后发现正常色散区的测量极限精度要优于反常色散区^[55]。

从结构色散角度考虑,通过调控反常色散来增强陀螺灵敏度的研究正在开展^[56],国内外相关研究(如 MZI 相位调制、谐振线宽展宽、闭锁效应和白光腔量子噪声等)也在理论分析和模拟仿真方面取得了一些结果。这表明,由结构引起的反常色散是提高陀螺灵敏度的有效途径,但还没有被实验证实。上述研究结果基本上都是在经典光物理理论基础上取得的,尚未涉及量子光学和非厄米物理领域。

4 非厄米光学陀螺

量子力学理论中的封闭系统用厄米哈密顿量描述,其本征值为实数,且各本征向量相互正交。非厄米哈密顿量描述的是开放系统,即与周围环境发生能量交换的系统,其本征值是复数且本征向量非正交。1998年,Bender等^[57]发现在宇称-时间(PT)反演对称条件下非厄米哈密顿量也存在着实数的本征值。2007年,El-Ganainy等^[58]利用光学傍轴波动方程与薛定谔方程在数学上的同构关系,提出了构建PT对称的光学系统。这一光学系统一经提出便成为研究非厄米物

理的理想平台,迅速引发了相关领域的研究热潮。目前,PT对称光学是非厄米光学中最为活跃的研究领域。2015年,PT对称光学以其新奇的物理效应及潜在的应用价值被*Nature Physics*期刊列为近10年十大物理发现之一^[59]。

4.1 奇异点

在量子力学中,PT对称系统的哈密顿量势函数满足 $\hat{V}(x)=\hat{V}^*(-x)$,光学系统中的PT对称条件为折射率满足 $n(x)=n^*(-x)$,即折射率的实部为偶函数 $n_R(x)=n_R(-x)$,而虚部为奇函数 $n_I(x)=-n_I(-x)$,所以可利用增益-损耗耦合谐振腔构建PT对称的非厄米光学系统。以二阶非线性光学系统为例,PT对称哈密顿量的本征值分为两个区域,即PT对称相位区(哈密顿量和本征向量都具有PT对称性)和PT对称破缺相位区(哈密顿量具有PT对称性,本征向量不具有PT对称性),它们对应的两个本征值分别为相同实数和共轭复数对,本征值虚部对应着系统的增益或损耗状态^[60-61]。从PT对称相位到PT对称破缺相位存在一个转变的分支点,该点也被称为奇异点(EP),是两个本征值和本征向量合并的点^[62]。相对于线性系统,传感系统在奇异点处有更大的响应。

PT对称耦合谐振腔结构的非厄米奇异点可用于旋转角速度的测量,其哈密顿量和本征频率分别为

$$H_{\text{PT}} = \begin{bmatrix} \omega - i\gamma - \Delta_s & \kappa \\ \kappa & \omega + i\gamma + \Delta_s \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$\omega_{\text{PT}1,2} = \omega \pm \sqrt{\kappa^2 - \gamma^2 + 2i\gamma\Delta_s + \Delta_s^2}, \quad (3)$$

式中: ω 为谐振腔的谐振频率; κ 为两个谐振腔之间的耦合率; γ 为增益损耗系数; Δ_s 为失谐量。从式(3)中的本征值可以看出失谐量的变化会导致系统偏离奇异点,引起本征频率分裂,增强对低旋转角速度的探测。目前研究的非厄米光学陀螺探测的输出量为频差信号。对频差探测方式而言,陀螺标度因子(S_F)的表达式为

$$S_F = \frac{\partial \Delta\omega_{\text{sp}}}{\partial \Omega}, \quad (4)$$

式中: $\partial \Delta\omega_{\text{sp}}$ 为非厄米陀螺系统输出频率差; $\partial \Omega$ 为输入的旋转角速度。

2017年,Khajavikhan课题组^[63]提出如图8(a)所示的PT对称光学陀螺方案,理论研究结果表明:基于奇异点的光学陀螺的频率分裂量为 $\Delta\omega_{\text{PT}} \sim 2\sqrt{|\Delta\omega \cdot \kappa|}$;与传统的光学陀螺相比,PT对称光学陀螺的标度因子提升了近6个数量级,可用于增强对低旋转速率的检测;基于奇异点的光学陀螺的频率分裂量与腔的尺寸无关,具备片上集成潜力。2017年,Sunada等^[64]提出了周期性调制折射率的PT对称光学陀螺结构,如图8(b)所示,并从理论上证明了其在奇异点处的频率分裂增强;数值仿真结果表明,该陀

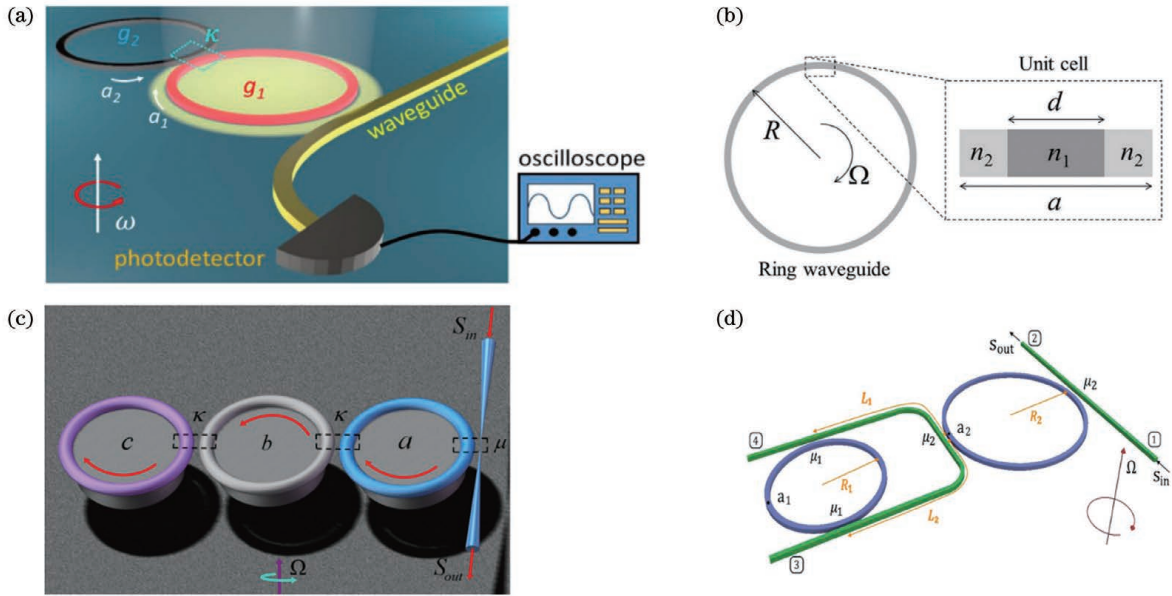


图 8 非厄米光学陀螺结构。(a) PT 对称激光陀螺结构^[63]；(b) 复折射率周期性调制的光学陀螺谐振腔结构^[64]；(c) 基于三阶奇异点的光学陀螺结构^[66]；(d) 反 PT 对称光学陀螺结构^[67]

Fig. 8 Non-Hermitian optical gyroscope structures. (a) PT-symmetric laser gyroscope structure^[63] ; (b) a ring resonator with a periodic complex refractive indices structure^[64] ; (c) three-order exceptional points based optical gyroscope structure^[66] ; (d) anti-PT-symmetric optical gyroscope structure^[67]

螺标度因子相比同等尺寸的传统谐振式陀螺提升了 2 个数量级。2018 年, de Carlo 等^[65] 研究发现利用 PT 对称光学微腔探测旋转时, 系统的传输谱上未显示频率分裂, 但传输谱的线宽有显著变化, 由此提出了模式展宽检测机制。2019 年, 北航研究小组针对图 8(c) 所示的基于三阶奇异点的陀螺进行了研究, 结果表明: PT 对称光学陀螺工作在三阶奇异点时的标度因子相比工作在二阶奇异点时提升了 1~2 个数量级^[66]。PT 对称光学陀螺利用传输谱的半峰全宽检测信号, 这无疑增加了探测难度, 且 PT 对称的实现需要严格控制增益和损耗之间的平衡。2019 年, de Carlo 等^[67] 首次提出了基于反 PT 对称的光学陀螺结构, 如图 8(d) 所示, 该结构可以直接测量输出的频率分裂, 且不受陀螺谐振腔尺寸的限制。

在反 PT 对称条件下, 旋转角速度导致的失谐量作用于本征频率的实部, 使得谐振模式的劈裂有利于信号探测和处理。PT 对称耦合谐振系统的典型哈密顿量和本征频率分别为

$$H_{\text{Anti-PT}} = \begin{bmatrix} -\omega - i\gamma - \Delta_s & i\kappa \\ i\kappa & \omega - i\gamma + \Delta_s \end{bmatrix}, \quad (5)$$

$$\omega_{\text{Anti-PT}1,2} = -i\gamma \pm \sqrt{-\kappa^2 + \omega^2 + 2\omega\Delta_s + \Delta_s^2}. \quad (6)$$

在实验方面, 2019 年 12 月 *Nature* 刊发了两篇基于奇异点增强光学陀螺灵敏度的文章。Khajavikhan 研究小组^[68] 对商用激光陀螺仪的光路进行改进, 即在激光陀螺光路中引入光阑以实现相向传输光场的耦合, 同时引入法拉第旋光器和半波片来调节相向传输光场的损耗差, 将激光陀螺仪系统调控至奇异点, 使得改进后的激光陀螺仪标度因

子较未改进前提升了 20 倍, 如图 9(b) 所示。Vahala 课题组^[69] 设计了非厄米受激布里渊微腔陀螺结构, 如图 9(c) 所示, 该陀螺在奇异点处的标度因子较传统布里渊激光陀螺增加了 4 倍, 如图 9(d) 所示。2020 年, Vahala 等^[10] 再次利用该方案[如图 9(e) 所示], 实现了对地球自转角速率的探测, 角度随机游走达到了 $0.068 (^{\circ})/\sqrt{h}$, 如图 9(f) 所示; 这一实验结果表明基于非厄米系统奇异点的光学陀螺兼具小尺寸和高灵敏度的特性。

4.2 奇异面

非厄米系统中的奇异点对应两个或多个本征态闭合, 本征态空间维数的减少使得奇异点对任何外部扰动都非常敏感, 因此, 非厄米光学系统具有实现超高灵敏度传感器的潜力。然而, 参数空间中孤立的奇异点对不可避免的加工误差或实验不确定性也非常敏感。偏离奇异点的非厄米光学系统, 其传感性能将大幅降低。提升非厄米光学系统的鲁棒性是提升非厄米光学微腔传感性能的关键措施之一。

Zhong 等^[70] 率先提出了奇异面(ES)的概念。它是一个嵌入高维参数空间的特征曲面, 由大量的奇异点组成, 如图 10 所示。奇异面提供了额外的自由度, 且结合了非厄米系统的鲁棒性和灵敏性。一方面, 制造误差和实验不确定性造成的扰动会使系统的工作点沿着奇异面的表面移动, 保证系统仍工作于奇异点, 具备了鲁棒性; 另一方面, 需要测量的扰动量迫使系统的工作点远离奇异面, 即远离奇异点, 使系统对扰动产生极大的响应。

由组成奇异点的参数的所有值组成的曲面如

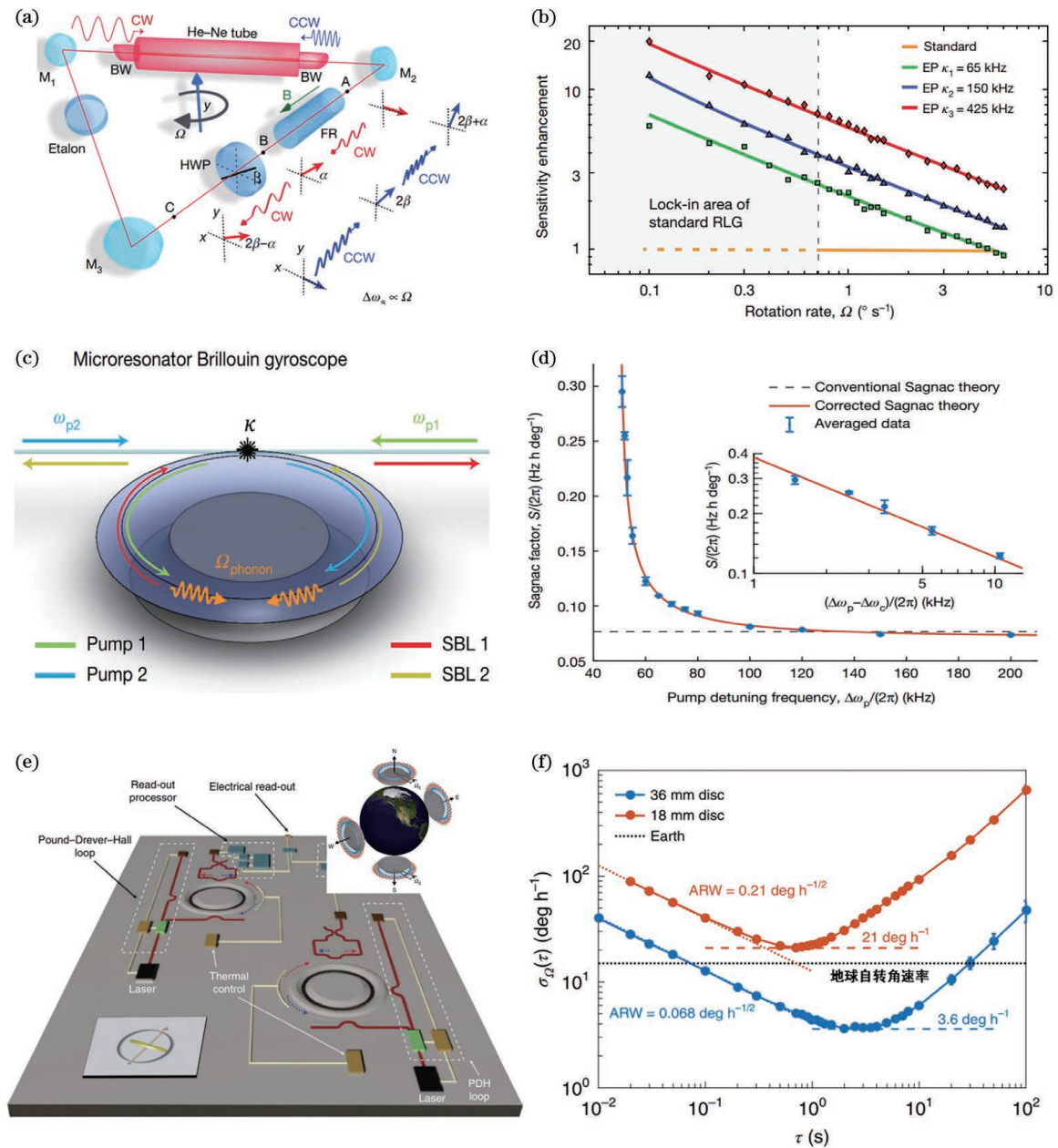


图 9 非厄米光学陀螺的实验方案。(a)非厄米激光陀螺示意图^[68]；(b)非厄米激光陀螺与传统激光陀螺频率分裂灵敏度的增强^[68]；(c)非厄米受激布里渊陀螺示意图^[69]；(d)非厄米受激布里渊陀螺与传统受激布里渊陀螺频率分裂灵敏度的增强^[69]；(e)片上非厄米受激布里渊陀螺结构示意图^[10]；(f)非厄米受激布里渊陀螺结构的角随机游走^[10]

Fig. 9 Experimental schemes of non-Hermitian optical gyroscopes. (a) Non-Hermitian laser gyroscope^[68]；(b) frequency splitting sensitivity enhancement of non-Hermitian and traditional laser gyroscopes^[68]；(c) schematic of non-Hermitian simulated Brillouin gyroscope^[69]；(d) frequency splitting sensitivity enhancement of non-Hermitian and traditional simulated Brillouin gyroscopes^[69]；(e) schematic of on chip non-Hermitian simulated Brillouin gyroscope structure^[10]；(f) angular random walk of non-Hermitian simulated Brillouin gyroscope^[10]

图 10 所示, 曲面上的任一参数值都能使系统处于奇异点。因此, 尽管制备加工误差和实验的不确定性会改变系统的本征频率, 但系统的简并度不变, 系统仍将处于奇异点。这一特性在产生孤立奇异点的常规非厄米系统中是无法实现的, 为非厄米光学系统提供了前所未有的鲁棒性。目前, 清华大学的龙桂鲁研究小组^[71]和美国宾夕法尼亚州立大学的 Özdemir 等^[72]均已利用光学微腔在实验上观测到了非厄米系统奇异面效应

(如图 11 所示), 并利用奇异面探测了纳米粒子的扰动情况。此外, 三阶奇异面的非厄米光学结构也被提出, 并且该结构还可以扩展成 N 阶奇异面的非厄米光学结构^[73]。

最近, 北航研究小组提出了通过调控手性奇异点增强旋转角速度探测的机制, 即利用 π -相移的光纤布拉格光栅将旋转引起的频差与腔内光学模式耦合关联起来, 为手性奇异点增强旋转探测提供理论基础; 设计

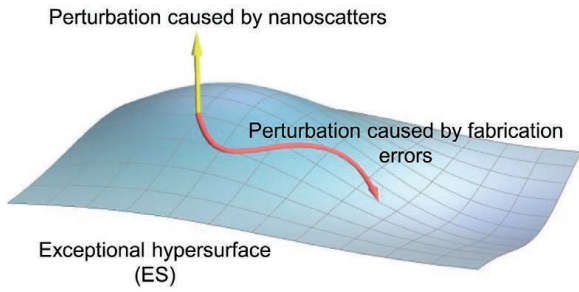


图 10 奇异面示意图^[70]

Fig. 10 Schematic of exceptional surface^[70]

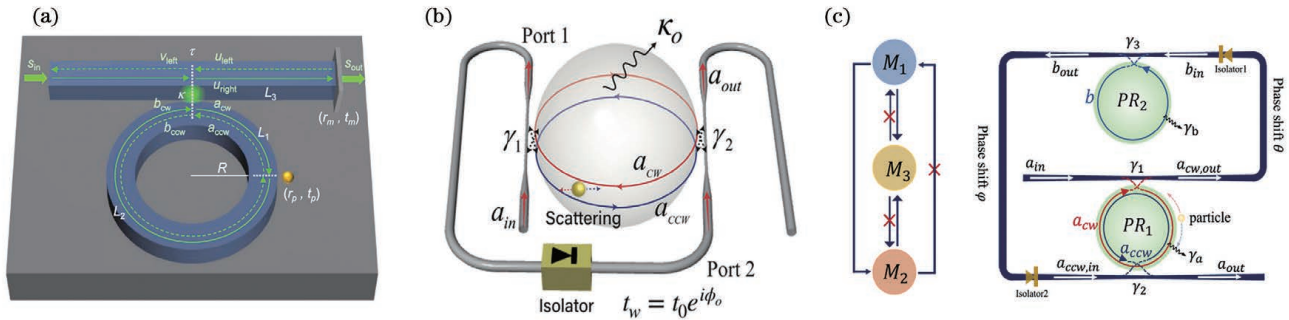


图 11 几种实现奇异面的光学结构。(a)微环谐振腔耦合直波导,波导的一端有一个反射镜,用来提供顺时针模式到逆时针模式的定向耦合^[70]; (b)光学微球腔耦合定向传输锥形光纤结构^[71-72]; (c)三阶奇异面的光学结构图,包含两个光学腔耦合定向锥形光纤^[73]

Fig. 11 Several optical structures to realize exceptional surface. (a) Microresonator is coupled to a straight waveguide with a mirror at one end to provide directional coupling from clockwise to counterclockwise modes^[70]; (b) optical microsphere cavity is coupled with directional conical fiber^[71-72]; (c) third order exceptional surface optical structure including two optical cavities coupled with directional conical fiber^[73]

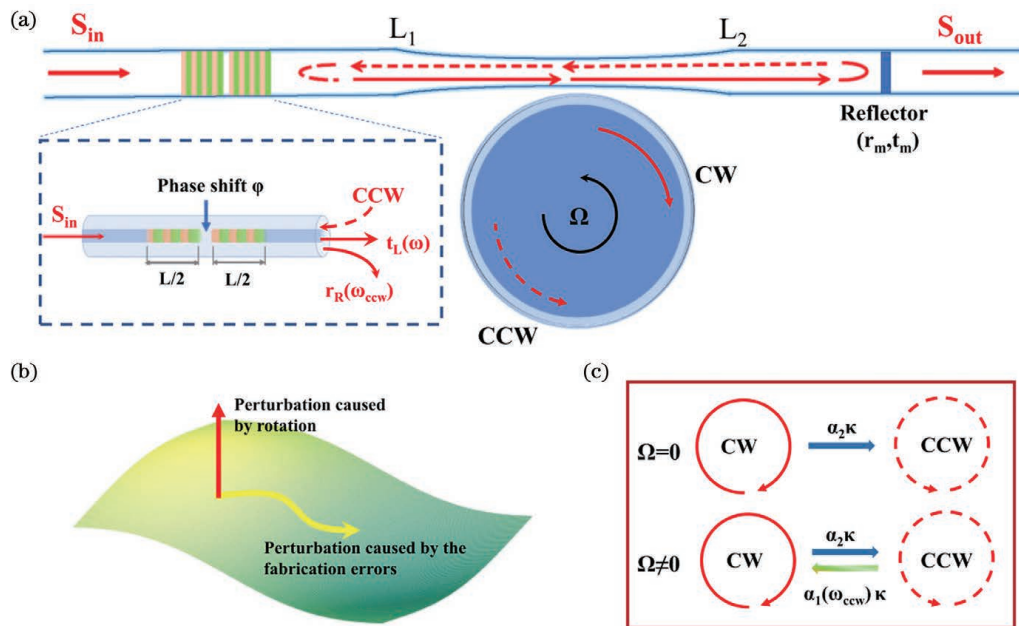


图 12 基于奇异面的非厄米光学陀螺^[74]。(a)陀螺结构及微腔耦合锥形光纤,光纤一侧是光纤部分反射器,另一侧是相移布拉格光栅;(b)奇异面示意图,奇异面具有系统受到非期望扰动时,系统工作点沿表面移动的特征;(c)静止和旋转时顺时针与逆时针模式的耦合

Fig. 12 Non-Hermitian optical gyroscope based on exceptional surface^[74]. (a) Gyroscope structure and microcavity coupled tapered fiber, partial reflector on one side and phase shift Bragg grating on the other side; (b) diagram of an exceptional surface, the exceptional surface shows that the system operating point moves on the surface when the system is subjected to an unexpected disturbance; (c) coupling between clockwise and counterclockwise modes in the stationary and rotating cavities

了光学微腔耦合嵌入光纤反射器以及 π -相移布拉格光栅的锥形光纤结构,利用奇异面实现旋转探测的增强^[74],如图 12 所示。在静态条件下,通过调控光学微腔和 π -相移布拉格光栅的结构参数,可将系统调控至奇异面,外部环境或加工误差导致的外耦合系数和腔损耗系数的变化均不会影响系统的探测性能。当系统旋转时, π -相移布拉格光栅引起腔内相向传输光学模式间的耦合,将系统推离奇异面。与传统的光学陀螺相比,旋转引起的频率分裂量获得了 4 个数量级的提升。

对于非厄米传感系统的鲁棒性而言,奇异点是参数空间中两个或多个本征态合并的点,本征态空间维数的减少使得奇异点对外部扰动非常敏感,此为奇异点能增强灵敏度的原因。同时,这也是基于奇异点的非厄米传感系统的弱点,因为系统会不可避免地制造误差和实验的不确定性非常敏感。利用奇异点实现非厄米传感系统对待测物理量高灵敏度响应通常要求较低的加工误差以及精确的实验调控。在过去的 10 年中,虽然人们在探究奇异点传感性能方面进行了大量的理论和实验工作,但仍有许多方面未被探索,对于奇异点能否提升信噪比的问题仍有待继续探究。

5 结束语

纵观近十几年微纳技术与光学陀螺的研究进展,从宏观角度可考虑新材料、新结构和新物理效应等协同实现高精度集成光学陀螺。在超低损耗材料方面,通过受激拉曼放大或稀土离子掺杂等方法引入光增益补偿损耗是切实可行的;在色散调控方面,材料色散或结构色散引起谐振线宽展宽抵消灵敏度增强还无法避免;在非厄米物理方面,将非厄米物理引入光学陀螺的研究已有相关报道。此外,利用微腔中光与物质相互作用产生的非线性效应增强 Sagnac 效应也是有潜力的研究方向^[11, 75]。

谐振式光学陀螺需要从外部注入激光,为确保陀螺的高灵敏度,需要使用可调谐窄线宽激光器,但现阶段这类激光器的体积较大且难以集成,可以考虑采用体积较小且可集成的传统半导体激光,但其发射波长并不在通信标准的 C 波段,与低损耗硅基光波导不在同一传输波长。近期报道了掺 Er^{3+} 的 Si_3N_4 光波导放大器,高质量可集成的 C 波段激光器或许不远了^[24]。此外,可集成的调制器、探测器也取得了相当大的进展,虽然仍受限于当前核心材料、工艺、技术等方面的制约,但相信这一切都会随着相关领域科学技术的快速发展而得到解决。

参 考 文 献

- [1] Bhaskaran S, Kennedy B. Closed loop terminal guidance navigation for a kinetic impactor spacecraft[J]. *Acta Astronautica*, 2014, 103: 322-332.
- [2] 前瞻产业研究院. 2021 年全球无人驾驶汽车行业市场现状及发展前景分析: 预计 2026 年全球市场规模将近 600 亿美元 [EB/OL]. (2022-01-11)[2022-02-04]. [EB/OL]. <https://bg.qianzhan.com/trends/detail/506/220111-6cdc5c7b.html>. China Institute with Professional Industry Research. Analysis on the market status and development prospects of the global driverless automobile industry in 2021: it is estimated that the global market scale will be nearly 60 billion US dollars in 2026 [EB/OL]. (2022-01-11)[2022-02-04]. <https://bg.qianzhan.com/trends/detail/506/220111-6cdc5c7b.html>.
- [3] TechPort. Chipscale integrated silica ring optical gyro, phase I [EB/OL]. [2022-02-04]. <https://techport.nasa.gov/view/18147>.
- [4] Khial P P, White A D, Hajimiri A. Nanophotonic optical gyroscope with reciprocal sensitivity enhancement[J]. *Nature Photonics*, 2018, 12(11): 671-675.
- [5] KVH. Versatile FOG & inertial system applications[EB/OL]. [2022-02-05]. <https://www.kvh.com/fog-and-inertial-systems/applications>.
- [6] 邓思盛, 肖志松, 燕路, 等. 集成光学陀螺及相关技术研究的现状与展望[J]. *物理*, 2012, 41(3): 179-185. Deng S S, Xiao Z S, Yan L, et al. The status and prospects of integrated optical gyroscopes and related topics [J]. *Physics*, 2012, 41(3): 179-185.
- [7] Post E J. Sagnac effect[J]. *Reviews of Modern Physics*, 1967, 39(2): 475-493.
- [8] Gundavarapu S, Belt M, Huffman T A, et al. Interferometric optical gyroscope based on an integrated Si_3N_4 low-loss waveguide coil[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, 36(4): 1185-1191.
- [9] Liang W, Ilchenko V S, Savchenkov A A, et al. Resonant microphotonic gyroscope[J]. *Optica*, 2017, 4(1): 114-117.
- [10] Lai Y H, Suh M G, Lu Y K, et al. Earth rotation measured by a chip-scale ring laser gyroscope[J]. *Nature Photonics*, 2020, 14(6): 345-349.
- [11] Silver J M, del Bino L, Woodley M T, et al. Nonlinear enhanced microresonator gyroscope[J]. *Optica*, 2021, 8(9): 1219-1226.
- [12] Liao A S H, Wang S. Semiconductor injection lasers with a circular resonator[J]. *Applied Physics Letters*, 1980, 36(10): 801-803.
- [13] Jezierski A F, Laybourn P J R. Integrated semiconductor ring lasers[J]. *IEE Proceedings J Optoelectronics*, 1988, 135(1): 17-24.
- [14] Ciminelli C, Dell'Olio F, Campanella C E, et al. Photonic technologies for angular velocity sensing[J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2010, 2(3): 370-404.
- [15] Hansen P B, Raybon G, Chien M D, et al. A 1.54- μm monolithic semiconductor ring laser: CW and mode-locked operation[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1992, 4(5): 411-413.
- [16] Sorel M, Giuliani G, Scire A, et al. Operating regimes of GaAs-AlGaAs semiconductor ring lasers: experiment and model[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2003, 39(10): 1187-1195.
- [17] Armenise M N, Passaro V M N, de Leonardi F, et al. Modeling and design of a novel miniaturized integrated optical sensor for gyroscope systems [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2001, 19(10): 1476-1494.
- [18] Rong H S, Xu S B, Kuo Y H, et al. Low-threshold continuous-wave Raman silicon laser[J]. *Nature Photonics*, 2007, 1(4): 232-237.
- [19] 肖志松, 燕路, 邓思盛. 提供受激拉曼散射光增益的硅基耦合谐振环结构构建方法: CN102147497A[P]. 2011-08-10. Xiao Z S, Yan L, Deng S S. Construction method of silicon-based coupled resonant ring structure to provide stimulated Raman scattering optical gain: CN102147497A[P]. 2011-08-10.
- [20] Li J, Suh M G, Vahala K J O. Microresonator Brillouin gyroscope[J]. *Optica*, 2017, 4(3): 346-348.
- [21] 韩勤, 刘佳铭, 张峰, 等. 提高稀土掺杂光波导放大器增益的技术进展[J]. *材料导报*, 2016, 30(17): 109-114, 133. Han X, Liu J M, Zhang F, et al. Approaching high gain in rare-earth-doped waveguide amplifiers: a technological review [J]. *Materials Review*, 2016, 30(17): 109-114, 133.
- [22] Bradley J D B, Pollnau M. Erbium-doped integrated waveguide amplifiers and lasers[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2011, 5(3): 368-403.
- [23] Pollnau M. Rare-earth-ion-doped channel waveguide lasers on silicon[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2015, 21(1): 414-425.
- [24] Liu Y, Qiu Z, Ji X, et al. A photonic integrated circuit-based erbium-doped amplifier[J]. *Science*, 2022, 376(6599): 1309-1313.

- [25] Monifi F, Kaya Özdemir Ş, Yang L. Tunable add-drop filter using an active whispering gallery mode microcavity[J]. *Applied Physics Letters*, 2013, 103(18): 181103.
- [26] Hsiao H K, Winick K A. Planar glass waveguide ring resonators with gain[J]. *Optics Express*, 2007, 15(26): 17783-17797.
- [27] 肖志松, 燕路, 邓思盛. 一种稀土掺杂玻璃基三维有源耦合谐振环结构的构建方法: CN102253449A[P]. 2011-11-23.
Xiao Z S, Yan L, Deng S S. A construction method of three-dimensional active coupled resonant ring structure based on rare earth doped glass: CN102253449A[P]. 2011-11-23.
- [28] Chen J Y, Zhang H, Jin J J, et al. Optimization of gyroscope properties with active coupled resonator optical waveguide structures[J]. *Proceedings of SPIE*, 2015, 9378: 93781Q.
- [29] Zhang T, Qian G, Wang Y Y, et al. Integrated optical gyroscope using active long-range surface plasmon-polariton waveguide resonator[J]. *Scientific Reports*, 2014, 4: 3855.
- [30] Wang Y Y, Zhang T. Spontaneous emission noise in long-range surface plasmon polariton waveguide based optical gyroscope[J]. *Scientific Reports*, 2014, 4: 6369.
- [31] 靳俊杰, 张浩, 陈佳阳, 等. 光增益型集成光学陀螺研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(3): 030002.
Jin J J, Zhang H, Chen J Y, et al. Research progress on integrated optical gyroscope with optical gain [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(3): 030002.
- [32] 邓思盛, 肖志松, 燕路, 等. 快慢光效应与光增益对光波导陀螺灵敏度的影响[J]. *科学通报*, 2013, 58(19): 1802-1808.
Deng S S, Xiao Z S, Yan L, et al. Slow-fast light and optical gain effects on sensitivity of integrated optical gyroscope[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2013, 58(19): 1802-1808.
- [33] Wang L J, Kuzmich A, Dogariu A. Gain-assisted superluminal light propagation[J]. *Nature*, 2000, 406(6793): 277-279.
- [34] Yablou J, Zhou Z F, Zhou M C, et al. Theoretical modeling and experimental demonstration of Raman probe induced spectral dip for realizing a superluminal laser[J]. *Optics Express*, 2016, 24(24): 27444-27456.
- [35] Scheuer J, Shahriar S M. Lasing dynamics of super and sub luminal lasers[J]. *Optics Express*, 2015, 23(25): 32350-32366.
- [36] Pati G S, Salit M, Salit K, et al. Demonstration of a tunable-bandwidth white-light interferometer using anomalous dispersion in atomic vapor[J]. *Physical Review Letters*, 2007, 99(13): 133601.
- [37] Shahriar M S, Pati G S, Tripathi R, et al. Ultrahigh enhancement in absolute and relative rotation sensing using fast and slow light[J]. *Physical Review A*, 2007, 75(5): 053807.
- [38] Smith D D, Myneni K, Odutola J A, et al. Enhanced sensitivity of a passive optical cavity by an intracavity dispersive medium[J]. *Physical Review A*, 2009, 80: 011809.
- [39] Smith D D, Luckay H A, Chang H, et al. Quantum-noise-limited sensitivity-enhancement of a passive optical cavity by a fast-light medium[J]. *Physical Review A*, 2016, 94(2): 023828.
- [40] AVweb. NASA's 'game changing' inertial navigation system [EB/OL]. (2012-11-03) [2022-02-04]. http://www.avweb.com/avwebflash/news/nasa_inertial_navigation_system_207633-1.html.
- [41] Scheuer J, Palocz G T, Poon J K S, et al. Coupled resonator optical waveguides: toward the slowing and storage of light[J]. *Optics and Photonics News*, 2005, 16(2): 36-40.
- [42] Scheuer J, Yariv A. Sagnac effect in coupled-resonator slow-light waveguide structures[J]. *Physical Review Letters*, 2006, 96(5): 053901.
- [43] Yan L, Xiao Z S, Guo X Q, et al. Circle-coupled resonator waveguide with enhanced Sagnac phase-sensitivity for rotation sensing[J]. *Applied Physics Letters*, 2009, 95(14): 141104.
- [44] Kalantarov D, Search C P. Effect of resonator losses on the sensitivity of coupled resonator optical waveguide gyroscopes[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(4): 985-988.
- [45] Terrel M A, Dignonnet M J F, Fan S H. Performance limitation of a coupled resonant optical waveguide gyroscope[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2009, 27(1): 47-54.
- [46] Terrel M, Dignonnet M J F, Fan S. Performance comparison of slow-light coupled-resonator optical gyroscopes[J]. *Laser & Photonics Review*, 2009, 3(5): 452-465.
- [47] Zhang H, Liu J M, Lin J, et al. On-chip tunable dispersion in a ring laser gyroscope for enhanced rotation sensing[J]. *Applied Physics A*, 2016, 122(5): 501.
- [48] Lin J, Liu J M, Zhang H, et al. Theoretical analyses of resonant frequency shift in anomalous dispersion enhanced resonant optical gyroscopes [J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 38759.
- [49] Zhang H, Chen J Y, Jin J J, et al. On-chip modulation for rotating sensing of gyroscope based on ring resonator coupled with Mach-Zehnder interferometer[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 19024.
- [50] Zhang H, Li W X, Han P, et al. The effect of broadened linewidth induced by dispersion on the performance of resonant optical gyroscope [J]. *Optics Communications*, 2018, 407: 208-216.
- [51] Zhang H, Li W X, Han P, et al. Mode broadening induced by rotation rate in an atom assisted microresonator[J]. *Journal of Applied Physics*, 2019, 125(8): 084502.
- [52] Wicht A, Danzmann K, Fleischhauer M, et al. White-light cavities, atomic phase coherence, and gravitational wave detectors[J]. *Optics Communications*, 1997, 134: 431-439.
- [53] Caves C M. Quantum-mechanical noise in an interferometer[J]. *Physical Review D*, 1981, 23(8): 1693-1708.
- [54] Barnett S M, Fabre C, Maitre A. Ultimate quantum limits for resolution of beam displacements[J]. *The European Physical Journal D*, 2003, 22(3): 513-519.
- [55] Chang X Y, Zhang H, Li W X, et al. Sensitivity enhancement of a dispersive cavity with squeezed vacuum light injection[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2022, 39(7): 1815-1821.
- [56] 赵龙, 张浩, 邓思盛, 等. 快光增强型谐振式光学陀螺的研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2013, 50(3): 030007.
Zhao L, Zhang H, Deng S S, et al. Research progress of fast-light enhanced resonant optical gyroscope [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(3): 030007.
- [57] Bender C M, Boettcher S. Real spectra in non-Hermitian hamiltonians having PT symmetry[J]. *Physical Review Letters*, 1998, 80(24): 5243-5246.
- [58] El-Gaainy R, Makris K G, Christodoulides D N, et al. Theory of coupled optical PT-symmetric structures[J]. *Optics Letters*, 2007, 32(17): 2632-2634.
- [59] Cham J. Top 10 physics discoveries of the last 10 years[J]. *Nature Physics*, 2015, 11(10): 799.
- [60] Feng L, El-Gaainy R, Ge L. Non-Hermitian photonics based on parity-time symmetry[J]. *Nature Photonics*, 2017, 11(12): 752-762.
- [61] Rüter C E, Makris K G, El-Gaainy R, et al. Observation of parity-time symmetry in optics[J]. *Nature Physics*, 2010, 6(3): 192-195.
- [62] Chang L, Jiang X S, Hua S Y, et al. Parity-time symmetry and variable optical isolation in active-passive-coupled microresonators[J]. *Nature Photonics*, 2014, 8(7): 524-529.
- [63] Ren J, Hodaei H, Harari G, et al. Ultrasensitive micro-scale parity-time-symmetric ring laser gyroscope[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(8): 1556-1559.
- [64] Sunada S. Large Sagnac frequency splitting in a ring resonator operating at an exceptional point[J]. *Physical Review A*, 2017, 96(3): 033842.
- [65] de Carlo M, de Leonardi F, Passaro V M N. Design rules of a microscale PT-symmetric optical gyroscope using group IV platform[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, 36(16): 3261-3268.
- [66] Jiang S, Chang X Y, Li W X, et al. On-chip high sensitivity

- rotation sensing based on higher-order exceptional points[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2019, 36(9): 2618-2623.
- [67] de Carlo M, de Leonardi F, Lamberti L, et al. High-sensitivity real-splitting anti-PT-symmetric microscale optical gyroscope[J]. *Optics Letters*, 2019, 44(16): 3956-3959.
- [68] Hokmabadi M P, Schumer A, Christodoulides D N, et al. Non-Hermitian ring laser gyroscopes with enhanced Sagnac sensitivity[J]. *Nature*, 2019, 576(7785): 70-74.
- [69] Lai Y H, Lu Y K, Suh M G, et al. Observation of the exceptional-point-enhanced Sagnac effect[J]. *Nature*, 2019, 576(7785): 65-69.
- [70] Zhong Q, Ren J, Khajavikhan M, et al. Sensing with exceptional surfaces in order to combine sensitivity with robustness[J]. *Physical Review Letters*, 2019, 122(15): 153902.
- [71] Qin G Q, Xie R R, Zhang H, et al. Experimental realization of sensitivity enhancement and suppression with exceptional surfaces[J]. *Laser Photonics Reviews*, 2021, 15(5): 2000569.
- [72] Soleymani S, Zhong Q, Mokim M, et al. Chiral and degenerate perfect absorption on exceptional surfaces[J]. *Nature Communications*, 2022, 13: 599.
- [73] Yang H, Mao X, Qin G Q, et al. Scalable higher-order exceptional surface with passive resonators[J]. *Optics Letters*, 2021, 46(16): 4025-4028.
- [74] Li W X, Zhou Y, Han P, et al. Exceptional-surface-enhanced rotation sensing with robustness in a whispering-gallery-mode microresonator[J]. *Physical Review A*, 2021, 104(3): 033505.
- [75] del Bino L, Silver J M, Stebbings S L, et al. Symmetry breaking of counter-propagating light in a nonlinear resonator[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 43142.

Research and Progress of Resonant Integrated Optical Gyroscopes

Xiao Zhisong^{1,2,3*}, Zhang Hao¹, Zhou Yang¹, Cai Wei², Li Wenxiu², Chang Xiaoyang²,
Jiang Shuo², Huang Anping²

¹ *Research Institute of Frontier Science, Beihang University, Beijing 100191, China;*

² *School of Physics, Beihang University, Beijing 102206, China;*

³ *Beijing Academy of Quantum Information Sciences, Beijing 100193, China*

Abstract

Significance Gyroscopes, which are the critical components of inertial navigation devices, determine the navigation positioning and attitude control of spacecraft, cranes and vehicle load, and unmanned systems. Due to its high precision, the demand for a miniaturized integrated gyroscope has become urgent. As the market demand for inertial sensor systems grows in the future, micro-nano integrated optical gyroscope technology should be the first choice of the next generation optical gyroscope. Gyroscopes are not only suitable for spacecraft attitude control but can also be used for automatic vehicle navigation systems and safety protection. Integrated optical gyroscopes may fill in the gaps because the global navigation satellite system can be blocked and the weight of laser or optical fiber gyros is extremely large. Resonator micro-nano optical gyroscopes can be used to achieve all-optoelectronic integration, where different separation devices, such as light source, modulator, resonator, and detector, are integrated on the same chip to reduce the volume, weight, and cost of the device. Micro-nano integrated optic gyroscopes should satisfy both the demand for integration and precision.

Progress The main problem is that the small area of the closed optical path at the micro/nanoscale decreases gyroscope sensitivity. To achieve a high-precision-resonant integrated optical gyroscope, new principles and technologies must be explored. The research progress of the integrated optical gyroscopes with optical gain, those that are dispersion-enhanced, and non-Hermitian optical gyroscopes are reviewed.

Because of the limitations of fabrication technology, the propagation loss of passive-optical waveguides cannot meet the requirement of high-precision micro-nano optical gyroscopes. To solve this problem, methods for exciting two laser beams in opposite directions or using the optical gain to compensate for the losses in the resonator are proposed. Several methods for achieving active resonators are introduced, such as semiconductor III-V materials, stimulated Brillouin scattering, stimulated Raman scattering, and rare earth ion doping. The development and problems of the gyroscopes with optical gain resonators are discussed. The main problems with the development of a resonant gyroscope with optical gain are as follows: (1) the mode competition in the active cavity causes nonreciprocity of the two beams, thereby making it difficult to establish the bidirectional operation of lasers; (2) for a gyroscope lock-in effect, the rough side of the wall of the processed optical waveguide causes backscattering and cross-coupling of clockwise and counterclockwise beams, resulting in no frequency difference in the output signal of the gyroscope at low rotation. (3) The optical pump technique is more complex because of the need to introduce a pump laser. However, an electric pump is more compact and suitable for developing the entire chip integration.

The dispersion relationship directly affects the propagation velocity of light, which can be divided into phase and group velocities. The Sagnac effect can be enhanced in an optical resonator by manipulating the group velocity of light.

Slow and fast lights correspond to normal and abnormal dispersions, respectively. Through numerous theoretical and experimental studies, several methods have regulated the group velocity of light, which mainly fall into two categories: material and structural dispersions. Several academic papers have discussed whether the precision of a slow-light gyroscope can be enhanced under normal dispersion conditions. The Sagnac frequency shift of a resonant optical gyroscope could be enhanced under the anomalous dispersion condition. The main problem of the dispersion-enhanced gyroscope is achieving optical dispersion relation, generation mechanism of fast-light, and its influence on the Sagnac effect in active waveguide resonators. However, resonance linewidth is broadened using material or structural anomalous dispersion, which may counteract the dispersion enhancement effect of a resonant optical gyroscope.

Optical microcavities, with high-Q factor and small-mode volume, can significantly enhance the light-matter interaction. They play an important role in the research of non-Hermitian optics and have become an important platform for their research. Presently, achieving ultra-high sensitivity optical sensing based on exceptional points is a research hotspot of non-Hermitian optical systems. We are committed to achieving highly sensitive non-Hermitian optical sensing by combining the theory of non-Hermitian optics and whispering gallery mode (WGM) microcavities. Under the same perturbation, the non-Hermitian optical system at the exceptional point has a larger response to external perturbations than the traditional optical system, thus providing a new method for achieving high-performance optical sensors. The exceptional surface provides additional degrees of freedom that can shift the working point along the exceptional point (EP) surface when the system experiences undesired perturbations, thus improving the robustness of the non-Hermitian optical system. An exceptional surface, composed of chiral exceptional points, can be achieved by breaking the time-reversal symmetry of microcavity.

Conclusions and Prospects By combing the research progress of micro-nano integrated technology and optical gyroscope in this study, we summarize the research status, bottlenecks, and future development of the integrated resonant optical gyroscopes. Based on the possible solutions, which include new materials, structures, and physical effects, we emphasize the influence and research progress of optical gain compensation, dispersion control, and exceptional points of the non-Hermitian optical system on the sensitivity of optical gyroscopes. Finally, the related research prospect for integrated optical gyroscopes are summarized.

Key words physical optics; optical gyroscopes; optical microcavity; dispersion relation; optical gain and loss; non-Hermitian exceptional point