

## 受激布里渊散射及其在集成化光学陀螺中的应用

柳辰琛, 高乘春, 杨合\*, 徐小斌, 宋凝芳

北京航空航天大学仪器科学与光电工程学院, 北京 100191

**摘要** 受激布里渊散射效应是一种典型的三阶光学非线性效应, 通过强光激发可以在不同介质中产生。受激布里渊散射激光具有低阈值、超窄线宽、相邻阶散射光相向传播等优异特性, 促进其在高分辨率光谱仪、光学传感以及量子计算等领域的广泛应用。布里渊激光输出的光谱线宽超窄且相邻阶光束相向传播, 为集成化光学陀螺的构建提供了便利。首先总结了受激布里渊散射效应的产生机理, 分析了不同介质中受激布里渊散射光的特性, 进而综述了基于微腔结构的布里渊光学陀螺的研究进展, 最后对基于布里渊散射效应的集成化光学陀螺的研究前景进行了展望。

**关键词** 散射; 受激布里渊散射; 布里渊激光器; 光学陀螺; 微腔; 奇异点

**中图分类号** O437.2

**文献标志码** A

**DOI:** 10.3788/CJL202249.1906004

## 1 引言

受激布里渊散射(SBS)是描述相干光与声子耦合作用的三阶光学非线性效应, 是材料中最强的光学非线性效应。1964年, 麻省理工学院的 Chiao 等<sup>[1]</sup>首次在石英及蓝宝石晶体中观察到强光激发产生的 SBS, 此后研究人员在光纤<sup>[2-3]</sup>、半导体微腔<sup>[4-11]</sup>、气体<sup>[12-14]</sup>和流体<sup>[15-17]</sup>等介质中均观察到了该效应。布里渊激光具有低阈值、极窄线宽、相邻阶光相向传播等特点, 在超窄线宽激光器<sup>[18-21]</sup>、光学传感<sup>[22-25]</sup>、快慢光器件<sup>[26-27]</sup>等领域具有重要的应用价值。随着半导体微纳加工技术的快速发展及科技产业对光学陀螺小尺寸、轻量化的迫切需求, 基于 SBS 的光学陀螺为高性能陀螺的微型化、集成化提供了新思路。

光学陀螺是基于 Sagnac 效应的全固态角速度传感器, 主要包括激光陀螺、光纤陀螺和微光学陀螺。激光陀螺具有超高标度因数稳定性的优点, 但其制备工艺要求极高。干涉式光纤陀螺通常采用宽谱光源, 无需稳频且结构简单, 但标度因数稳定性劣于激光陀螺, 同时为保证陀螺精度, 光纤长度需数千公里且精密成环, 难以实现集成化。谐振式光纤/微光学陀螺的核心部件为光纤/波导谐振腔, 仅需几十米光纤或毫米级片上波导即可保证陀螺的高精度。谐振式光学陀螺可分无源和有源两种<sup>[28]</sup>。虽然经过了数十年的技术攻关, 但受制于光源线宽、稳定性及各种光学噪声、系统复杂性等因素, 无源谐振式光学陀螺仍停滞于实验室研究

阶段。近些年随着微纳加工技术的发展, 基于微腔的布里渊有源谐振式光学陀螺取得了较大的进展, 集激光陀螺与传统光纤陀螺优点于一体, 具有易集成、低阈值、高增益、大动态范围和高灵敏度等优点, 有望成为新一代光学陀螺的发展方向。本文介绍了 SBS 的基本原理, 总结了不同介质中布里渊激光器的特点, 进而综述了基于微腔结构的集成化布里渊光学陀螺的研究进展, 并展望了奇异点(EP)理论在高灵敏度集成化光学陀螺领域的应用前景。

## 2 布里渊散射效应基本原理

光散射现象广泛存在于光与粒子的相互作用中, 从机理来讲大致可以分为弹性散射和非弹性散射两种。弹性散射改变光子的方向而不改变其能量, 因此频率不发生变化, 如米氏散射、瑞利散射等; 入射光子与介质发生的非弹性碰撞导致其频率和方向均发生改变的光散射称为非弹性散射, 如布里渊散射、拉曼散射等。如图 1 所示, 与入射光频率相同的为瑞利散射谱, 两侧频移量较小的谱线为布里渊散射谱, 频移量较大的谱线为拉曼散射谱; 红移的散射谱称作斯托克斯光, 蓝移则为反斯托克斯光。对布里渊散射和拉曼散射而言, 当入射光强度超过一定阈值时, 光场与介质发生强相互作用, 引发辐射强度较大的受激散射光。SBS 是由入射光波与介质中被激发的声学声子之间的非线性耦合作用引起的, 受激拉曼散射是由入射光波与介质中光学声子相互作用的结果, 布里渊频移量远小于拉

收稿日期: 2022-05-25; 修回日期: 2022-07-03; 录用日期: 2022-09-13

基金项目: 国防科技重点实验室基金(KZ15-0233-01)

通信作者: \*yanghe@buaa.edu.cn

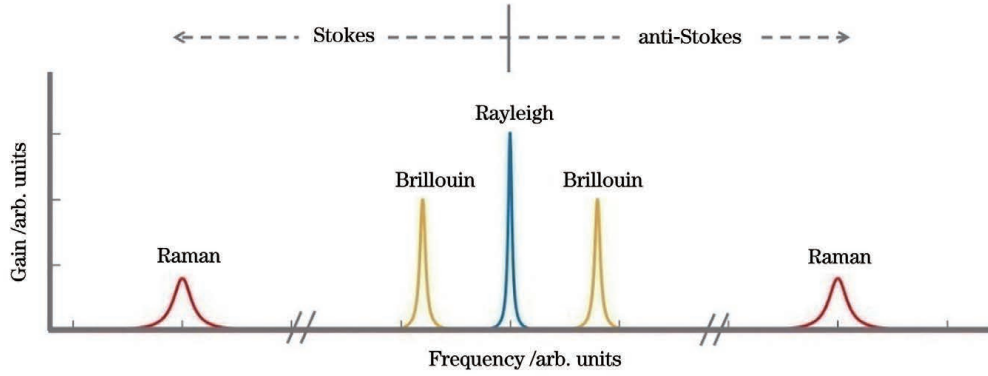


图 1 散射光频谱示意图

Fig. 1 Schematic diagram of scattered light spectrum

曼频移量。

布里渊散射效应的经典量子物理描述为光子场与声子场之间的相干耦合<sup>[29]</sup>,具体表现为入射光子的湮灭伴随一个声子的产生或湮灭,形成斯托克斯或反斯托克斯频率的散射光。频率为  $\omega_p$  的泵浦光子在介质中产生频率为  $\omega_\Omega$  的声学声子,二者相互作用产生的斯托克斯分量频率为  $\omega_s = \omega_p - \omega_\Omega$ ;对于反斯托克斯分量而言,  $\omega_{as} = \omega_p + \omega_\Omega$ ,具体形成过程如图 2 所示。当观察特定方向上散射光的频谱时,频移量  $\nu_B = 2nv_a/\lambda_p$ ,其中  $n$  为折射率,  $v_a$  为声速,  $\lambda_p$  为泵浦光波长。由于声学频率远小于光学频率,布里渊散射光的两条谱线与入射频率极为接近,称为布里渊双峰<sup>[30]</sup>。

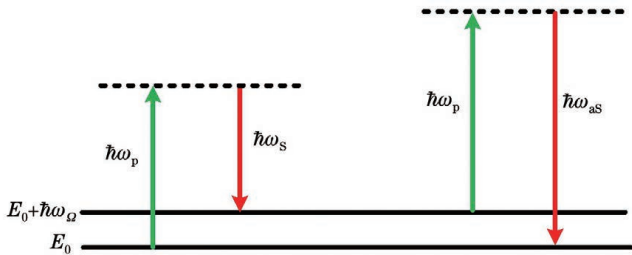


图 2 布里渊散射过程的能级示意图

Fig. 2 Energy level diagram of Brillouin scattering process

表征 SBS 的基本参数主要有布里渊增益谱的半高全宽  $\Delta\nu$ 、增益峰值  $g_B$  及阈值  $P_{th}$  等。固体介质中<sup>[9,31]</sup>:

$$\Delta\nu = \frac{1}{\tau_B} = \frac{16\pi^2 n^2 \eta}{\lambda^2}, \quad (1)$$

$$g_B = \frac{2\pi n^7 p_{12}^2}{c\lambda^2 \rho v_a \Delta\nu}, \quad (2)$$

$$P_{th} = \frac{21A_{eff}}{\delta g_B L_{eff}}, \quad (3)$$

式中:  $\tau_B$  代表声子寿命,由材料的折射率  $n$ 、黏性阻尼  $\eta$  及入射光波长  $\lambda$  决定;  $p_{12}$  为纵向光弹系数;  $c$  为光速;  $\rho$  为介质密度;  $\delta$  为泵浦光与 SBS 光间的偏振因子;  $A_{eff}$  为有效模式面积;  $L_{eff}$  为有效长度。

由式(2)可知,  $g_B$  受折射率影响极大,当所有其他参数几乎相等时,折射率大的材料会产生更高的增益,因此通过对材料进行适当掺杂以增大折射率可提高介

质的布里渊增益。由式(3)可知,产生 SBS 光的泵浦阈值与介质的长度成反比,当其自身的增益峰值较小时,通过增加介质的长度可降低阈值。

对于流体介质而言, SBS 的性质与流体的特性相关,相应的增益谱半高全宽及峰值表征为<sup>[32]</sup>

$$\Delta\nu = \frac{[8\pi n^2 v_a (\gamma - 1)]}{\lambda^2 \rho} \left[ \frac{\kappa}{C_p} + \frac{3\eta_b + 4\eta_s}{3(\gamma - 1)} \right], \quad (4)$$

$$g_B = \frac{\gamma_e^2 \omega^2}{n v_a c^3 \rho \Delta\nu}, \quad (5)$$

式中:  $\eta_b$  为体积黏度;  $\eta_s$  为剪切黏度;  $\gamma$  为绝热指数;  $C_p$  为恒压热容;  $\kappa$  为热导率;  $\omega$  为泵浦光角频率;  $\gamma_e$  为电致伸缩常数。

增大流体介质的压强可提高其布里渊增益,如 Yang 等<sup>[33]</sup>将  $CO_2$  气体充入空芯光子晶体光纤(PCF)并加压至 4.1 MPa(41 bar),此时其布里渊增益峰值  $g_B \approx 1.68 \text{ m}^{-1} \cdot \text{W}^{-1}$ ,比标准单模光纤布里渊增益值高 6 倍,远远大于  $CO_2$  置于自由空间内的情况。

### 3 基于布里渊散射效应的光学陀螺研究

布里渊光纤陀螺结构如图 3 所示。泵浦光经耦合器 OC1 后分成两束强度相等的光,经过耦合器 OC2 后进入环形谐振腔。谐振腔中泵浦光强度达到阈值后将在环形腔中产生 SBS 光。由于光学 Sagnac 效应, SBS 光频率随环形谐振腔的转速发生变化。对顺逆时针 SBS 光进行拍频处理,即可得出系统的旋转角速度:

$$\Delta f = \frac{D}{\lambda n} \Omega, \quad (6)$$

式中:  $\Delta f$  为顺逆时针 SBS 光的频差;  $\Omega$  为环形谐振腔的旋转角速度;  $D$  为环形腔的直径;  $\lambda$  为泵浦光波长;  $n$  为介质折射率。

陀螺系统的稳定性受到光源波长稳定性限制,因此,需采用稳频技术以满足布里渊光纤陀螺对光源稳定性的要求。作为第三代光纤陀螺,布里渊光纤陀螺集激光陀螺与传统光纤陀螺优点于一体,具有信号线

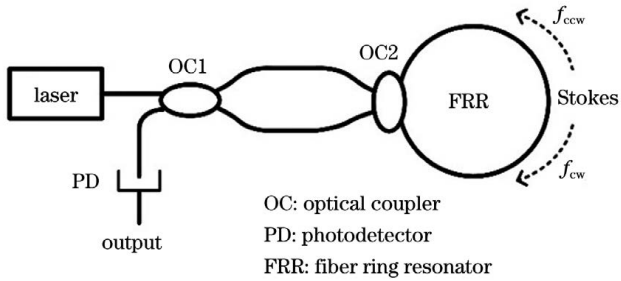


图 3 布里渊光纤陀螺基本结构

Fig. 3 Basic structure of Brillouin fiber optical gyroscope

性输出、大动态范围和高灵敏度等优点,在实现陀螺微型化、高灵敏度方面具有应用潜力。

布里渊光学陀螺的本质是同腔布里渊激光器,因此高性能、窄线宽、低噪声的布里渊激光器是布里渊光学陀螺进一步发展的关键技术基础。下面首先介绍基于气体、液体、光纤以及微腔材料等不同介质的布里渊激光器,然后对布里渊光学陀螺的研究进展进行综述。

### 3.1 布里渊激光器

#### 3.1.1 布里渊气体激光器

气体 SBS 的强度与气压正相关,自由空间中气体密度较小,因此通常在空芯 PCF 或密封腔体中对气体加压以提高布里渊增益系数,目前研究的气体类型包括  $\text{CO}_2$ 、 $\text{SF}_6$ 、 $\text{CH}_4$ 、 $\text{N}_2$ 、 $\text{Ar}$ 、 $\text{Xe}$  等<sup>[32,34-36]</sup>。气体介质的布里渊频移较固体介质小,一般为百 MHz 量级,加压至 10 MPa 以上时布里渊线宽可达到 10~45 MHz<sup>[37]</sup>。

Yang 等<sup>[13]</sup>通过向空芯 PCF 中充入高压  $\text{CO}_2$  气体增强 SBS,在 4.1 MPa 气压下实现了约 320 MHz 的布里渊频移,线宽约为 3.65 MHz,布里渊增益系数达  $8.56 \times 10^{-11} \text{ m/W}$ ,是普通单模光纤的 6 倍。同时,该团队也将这一成果应用在低阈值气体布里渊激光器和高性能分布式温度传感器中,气体布里渊激光器如图 4 所示。但是,气体在高压下击穿阈值较低,对装置的安全性和气密性要求极高,制约了 SBS 在气体介质中的应用。

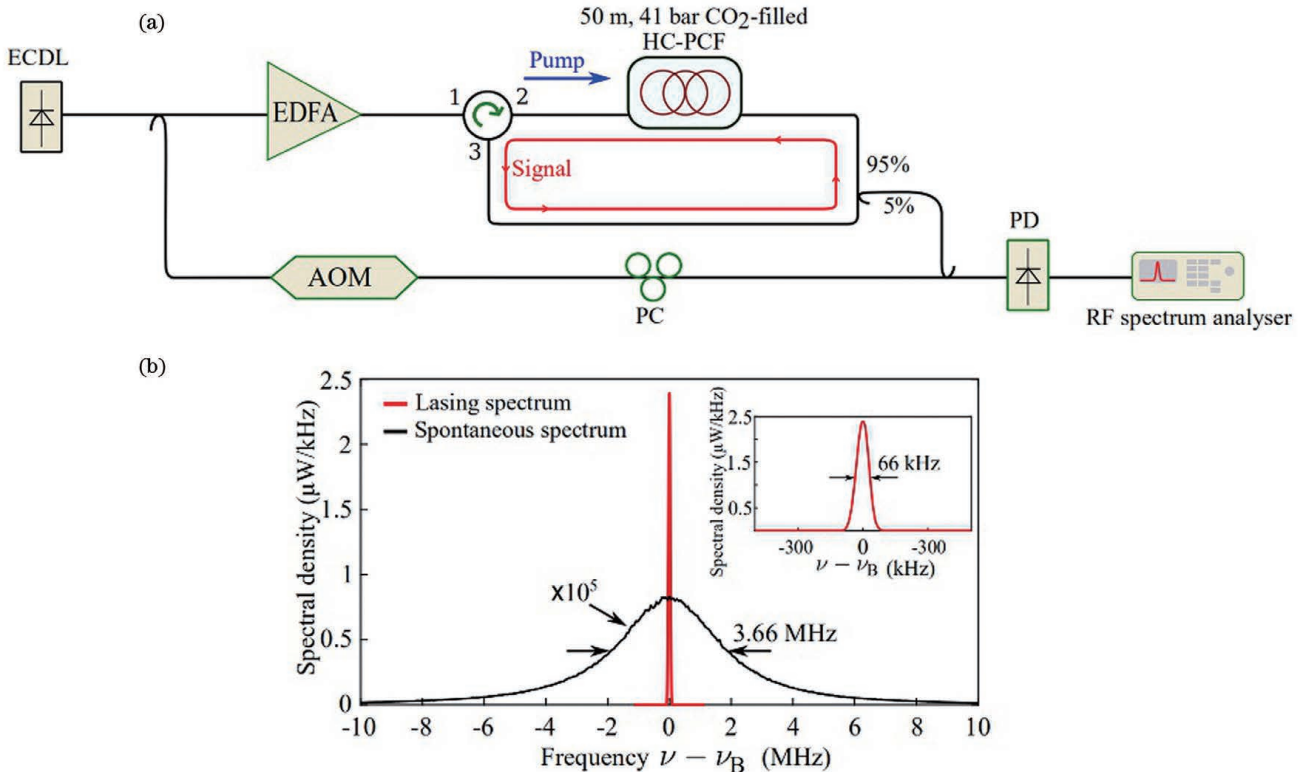


图 4 气体布里渊激光器<sup>[13]</sup>。(a)激光器结构示意图;(b)自发与受激布里渊散射谱

Fig. 4 Gas Brillouin laser<sup>[13]</sup>. (a) Schematic diagram of laser structure; (b) spontaneous and stimulated Brillouin scattering spectra

#### 3.1.2 布里渊液体激光器

液体介质中 SBS 的强弱主要受液体化学纯度影响,杂质会吸收部分泵浦光能量转换为分子热运动,同时降低液体的相位共轭度与击穿阈值<sup>[36,38]</sup>。液体介质中 SBS 的研究覆盖无机液体 ( $\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{CCl}_4$ 、 $\text{CS}_2$ 、 $\text{TiCl}_4$  等<sup>[39-44]</sup>)、有机液体 ( $\text{CH}_4$ 、 $\text{C}_2\text{H}_6$ 、 $\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$ 、重氟碳化合物等<sup>[39,41,43,45]</sup>)以及超流体<sup>[46]</sup>等。超流体布里渊激光器研究成果如图 5 所示。目前报道的无机液

体中, $\text{H}_2\text{O}$  的布里渊增益系数约为  $3.8 \times 10^{-11} \text{ m/W}$ ,  $\text{CS}_2$  的增益系数最高<sup>[47]</sup>,约为  $\text{H}_2\text{O}$  增益系数的 18 倍<sup>[48]</sup>。有机液体中, $\text{C}_6\text{H}_{14}$  的 SBS 增益系数最高,约为  $\text{H}_2\text{O}$  增益系数的 7 倍<sup>[43]</sup>。由于大部分有机液体分子的声子寿命更短,因此无机液体的布里渊线宽小于多数有机液体,其中  $\text{CS}_2$  产生的最窄 SBS 光线宽约为 52.3 MHz,有机液体中由  $\text{C}_6\text{H}_{14}$  所产生的最窄 SBS 线宽约为 222 MHz<sup>[43]</sup>。综合所有报道的液

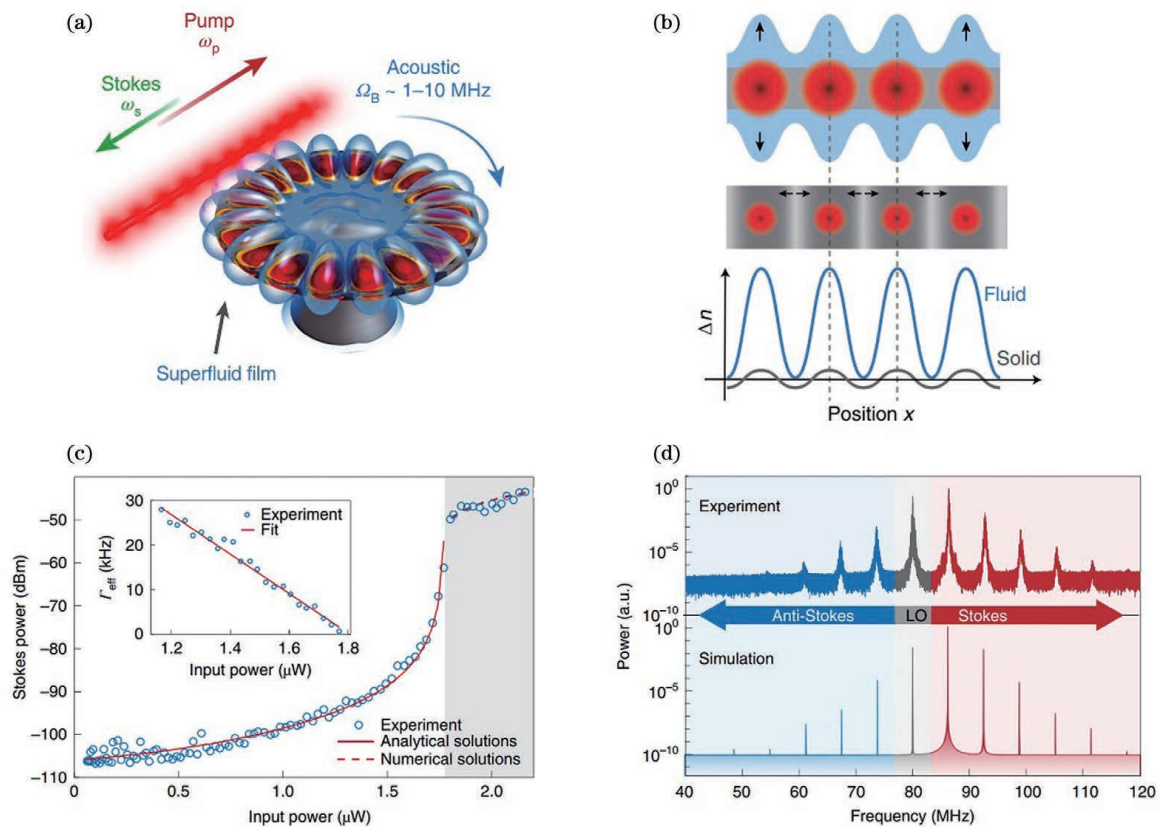


图 5 超流体布里渊激光器<sup>[46]</sup>。(a)超流体谐振腔中的后向布里渊散射过程；(b)超流体系统中布里渊相互作用示意图；(c)受激布里渊散射光功率与泵浦光功率；(d)受激布里渊散射光光谱

Fig. 5 Superfluid Brillouin laser<sup>[46]</sup>. (a) Backward Brillouin scattering process in superfluid optomechanical resonator; (b) schematic illustration of the Brillouin interaction in superfluid system; (c) SBS peak power versus pump laser power; (d) SBS spectra

体中的布里渊频移量,基本在 1~5 GHz 范围<sup>[37]</sup>,其中最大为 CS<sub>2</sub> 的 5.85 GHz<sup>[49]</sup>,最小为 FC-43 的 1.073 GHz<sup>[37,50]</sup>。

由于盛放液体的容器设计相对简单且不受体积限制,通过物理混合具有相似理化性质的液体可获得新的 SBS 特性<sup>[51]</sup>,因此液体中的 SBS 在相位共轭<sup>[52]</sup>、布里渊增强四波混频<sup>[53]</sup>、SBS 脉冲压缩技术<sup>[54-56]</sup>等领域具有应用价值。

### 3.1.3 布里渊光纤激光器

光纤中的泵浦光强达到 SBS 阈值后,由电致伸缩效应产生的弹性声波场将导致介质折射率的周期性调制,该过程可看作产生了一个以声速  $v_a$  运动的光栅,通过布拉格衍射散射泵浦光。由于多普勒效应,散射光相对泵浦光的频率发生了下移。1972 年, Ippen 等<sup>[31]</sup>首次在光纤中观察到了 SBS。光纤限制光能力强、制作工艺成熟、易于耦合且传输损耗低,被视为产生 SBS 的极佳介质。

光纤拉制工艺的进步和 PCF 的发展为增大光纤折射率、减小光纤有效模式面积提供了可行方案,有利于构建高增益、低阈值的布里渊激光器。形成光纤的介质主要是 SiO<sub>2</sub>,其纵向光弹系数大于硫系玻璃的纵向光弹系数,然而其折射率相对较小,可通过掺杂技术

综合考虑以提高布里渊增益。浙江大学采用 13.5 m 的高掺锗光纤得到了调谐范围 1920~2030 nm、阈值功率为 47 mW 的单纵模布里渊激光器,激光理论线宽小于 0.9 kHz<sup>[57]</sup>。宁波大学利用 As<sub>2</sub>S<sub>3</sub> 掺杂的小纤芯光纤,制备出多波长布里渊光纤激光器,通过设计模场适配器并引入腔反馈机制,将激光转换效率提高近 1 倍,成功获得了低阈值、低耦合损耗、高功率的多波长激光器<sup>[58]</sup>,其结构如图 6 所示。日本国家信息与通信研究院指出碲酸盐掺杂光纤的布里渊增益系数可较传统光纤增大 5 倍<sup>[59]</sup>。法国 CNRS 公司对不同浓度 GeO<sub>2</sub> 掺杂光纤的 SBS 进行研究,发现 GeO<sub>2</sub> 掺杂浓度为 98% (摩尔分数) 时,其布里渊增益较传统单模光纤 (GeO<sub>2</sub> 掺杂浓度 3.8%) 增大 7 倍<sup>[60]</sup>。

与单模光纤相比,PCF 的结构具有良好的可控性,通过对结构及材料的灵活设计,可以兼顾较大的折射率及较小的光纤有效模式面积,进而有效提高光纤的非线性响应。目前已报道有利用六角形、八角形等不规则纤芯及包层设计结构<sup>[61-63]</sup>以及 PCF 纤芯掺杂方案<sup>[64-66]</sup>实现了高 SBS 增益,如 Cherif 课题组<sup>[67]</sup>设计了直径为 1 μm 的硫化物掺杂 PCF,结果显示其增益是单模光纤的 100 倍。

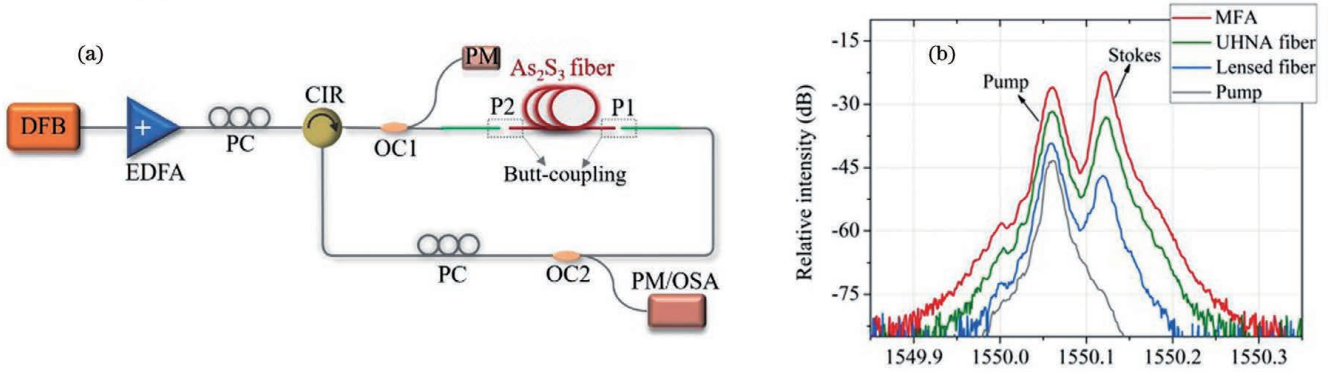


图 6  $\text{As}_2\text{S}_3$  掺杂的布里渊光纤激光器<sup>[58]</sup>。(a) 布里渊光纤激光器实验图; (b) 不同耦合器件的输出光谱

Fig. 6  $\text{As}_2\text{S}_3$ -doped Brillouin fiber laser<sup>[58]</sup>. (a) Experimental setup of Brillouin fiber laser; (b) output spectra with different coupling devices

### 3.1.4 片上集成布里渊激光器

光学微腔通过全内反射的方式将光波限制在腔内,对腔内光子在时间和空间具有约束作用,分别用品质因子(Q)和模场体积( $V_{\text{mode}}$ )两个特征参量来表征。 $Q = \omega \cdot t$  ( $\omega$  和  $t$  分别为谐振腔中光子的角频率和寿命)表征了微腔对光子约束时间的长短,  $V_{\text{mode}}$  表征微腔对光子的空间约束能力。Q 值越大,对光子的约束时间越长,微腔中的有效光功率越高;  $V_{\text{mode}}$  越小,对光子的约束空间越小,腔内的光功率密度越高。因此,微腔具有极小模场体积和超高 Q 值的优势<sup>[68-70]</sup>,是研究光与物质间非线性效应的理想平台。

近些年,随着微纳加工技术和新型材料的发展,基于 SBS 的片上光子器件在快慢光产生<sup>[71]</sup>、光频梳<sup>[71]</sup>、调谐灵敏度增强<sup>[72-73]</sup>及窄线宽布里渊激光器<sup>[74]</sup>等诸多领域发挥了重要作用。基于片上 SBS 的快慢光技术在实现全光可控延迟方面表现出了极大的灵活性,具有尺寸小、易于集成、延迟量可控、工作带宽及波长可任意选择等优势。在片上光源产生领域,光频梳是由频率空间中等距线组成的光源,在高精度频率计量、光谱学、遥感等领域具有重要应用。基于级联 SBS 可产生间距约为 10 GHz 的高相干频率梳,与其他光频梳产生方案相比,该方案的优势在于产生的光谱间距

与布里渊频移量相等(主要取决于增益介质特性和入射泵浦频率),光谱间距相对更稳定。研究表明 SBS 在亚波长各向异性波导中可实现调谐和控制效果,例如在几乎不改变声子频率的情况下对 SBS 增益进行更灵敏的调谐。基于光学微腔结构的 SBS 激光器在低阈值、高增益、极窄线宽输出方面具有极大优势,是集成化光学陀螺的核心部件。在光学微腔中实现 SBS 的难点在于在极小尺寸的器件上获得足够的布里渊增益,通常使用具有高折射率及纵向光弹系数的材料实现对光场和声场的强限制作用,同时设计谐振腔结构以增长声光相互作用的有效距离。

2009 年加州理工学院的 Grudinin 等<sup>[4]</sup>首次在  $\text{CaF}_2$  光学微腔中实现了 1550 nm 的 SBS 激光输出,其阈值仅为  $3 \mu\text{W}$ 。2011 年, Pant 等<sup>[9]</sup>通过掺杂及结构设计,首次展示了基于  $\text{As}_2\text{S}_3$  脊型波导结构的片上 SBS 激光器,其布里渊增益约为标准石英光纤的 100 倍,波导传输损耗  $0.2 \text{ dB/cm}$ 。与  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Si}_3\text{N}_4$  相比,  $\text{As}_2\text{S}_3$  折射率较高,更容易限制光在波导结构内传播。加利福尼亚大学 Chauhan 团队<sup>[75]</sup>2021 年制作出损耗  $1 \text{ dB/m}$ 、Q 值为  $5.54 \times 10^7$  的  $\text{Si}_3\text{N}_4$  微腔,研制出阈值  $14.7 \text{ mW}$ 、 $269 \text{ Hz}$  线宽的高相干片上集成可见光波段激光器,如图 7 所示。

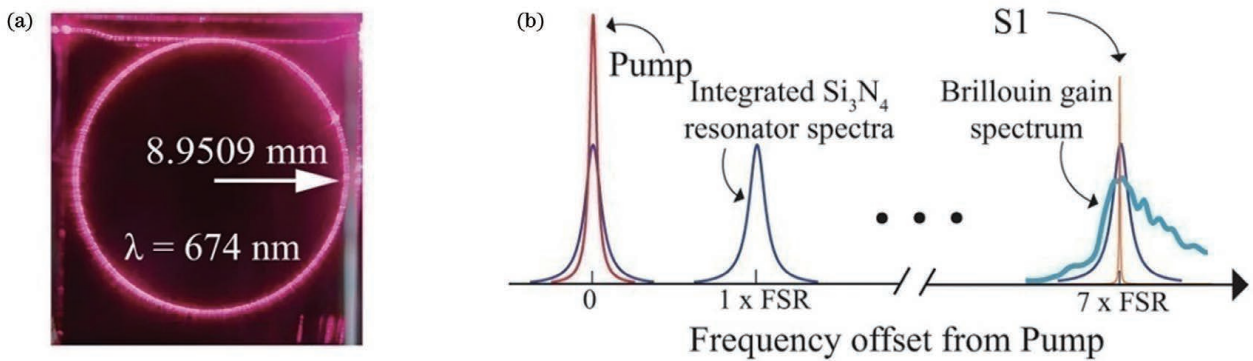


图 7 布里渊微腔激光器<sup>[75]</sup>。(a) 微腔示意图; (b) 泵浦光、微腔谐振谱与受激布里渊散射谱

Fig. 7 Brillouin microcavity laser<sup>[75]</sup>. (a) Schematic diagram of microcavity; (b) pump, resonator spectra and Brillouin gain spectrum

SBS 已在各种固体、液体和气体介质中进行了研究,其性质因增益介质的不同而存在较大差异。表 1 总结了不同介质中的 SBS 增益谱性质及应用,为 SBS 在光谱学、光学传感、激光器等领域的应用提供参考。

表 1 不同介质中的典型 SBS 光学参数及应用

Table 1 SBS parameters and applications in different media

Material	Brillouin gain coefficient / $(10^{-11} \text{ m} \cdot \text{W}^{-1})$	Full width at half maximum /MHz	Frequency shift /GHz	Application	Ref.
Fiber	Single mode fiber	4.300	20	10.8	[31]
	GeO <sub>2</sub> -doped fiber	0.567	98	7.7	Fiber laser <sup>[18-21]</sup> , [60]
	Tellurite-doped fiber	21.6	23.6	7.882	fiber sensing <sup>[22-25]</sup> , [59]
	As <sub>2</sub> S <sub>3</sub> -PCF	591	13.2	8.19	fast and slow light <sup>[26-27]</sup> [67]
	Sulfide-tellurite PCF	13.2	~50	7.77	[76]
Microcavity	As <sub>2</sub> S <sub>3</sub>	71.5	34	7.7	Optical microcavity sensing <sup>[77-83]</sup> , [9]
	CaF <sub>2</sub>	280	12.2	12.1	optical storage <sup>[84]</sup> and [4]
	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	0.2783	153	10.93	quantum dots <sup>[85]</sup> [7]
Gas	N <sub>2</sub>	14.71	13.84	0.456	Optical sensor <sup>[32]</sup> , gas laser <sup>[33]</sup> , optical amplifier <sup>[6]</sup> and phase conjugation <sup>[86-87]</sup> [32]
	CO <sub>2</sub>	83.92	5.563	0.349	
	SF <sub>6</sub>	332.4	2.007	0.176	
	CH <sub>4</sub>	34.78	17.65	0.582	
	O <sub>2</sub>	10.05	15.47	0.425	
	Ne	61.86	17.68	0.588	
Liquid	H <sub>2</sub> O	3.8	317	5.69	Phase conjugation <sup>[52]</sup> , four-wave mixing <sup>[53]</sup> and SBS pulse compression <sup>[54-56]</sup> [49]
	CS <sub>2</sub>	68	52.3	5.85	
	CCl <sub>4</sub>	6.0	520	4.39	
	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH	12	353	4.55	
	FC-75	4.5-5	350	1.34	
	FC-77	5.1	486	1.36	
	HT-70	5.7	359	1.166	
HT-200	4.7	1724	1.446	[41]	

### 3.2 集成化布里渊光学陀螺

控制高压气体混合物实现性能稳定的 SBS 难度较大,且高压环境对气室密封性能和安全性要求严苛,因此气体不宜作为布里渊光学陀螺的增益介质。液体的纯度对 SBS 增益影响较大,但易获得的无机液体在红外波长范围内吸收系数高、光损耗大,且化学结构不稳定,须定期更换液体,大大增加维护要求和成本;CS<sub>2</sub> 和 CCl<sub>4</sub> 虽然在布里渊增益方面表现优良,但具有高毒性,需在过滤、填充和密封等方面采取其他保护措施。这些因素限制了液体在布里渊光学陀螺中的应用。光纤及微腔作为光的重要传播介质,具有稳定性高、传播损耗低、安全性高等特点,适合在布里渊光学陀螺中作为谐振腔敏感角速度。

美国麻省理工学院 Thomas 等<sup>[88]</sup> 阐释了布里渊

光纤激光器用于测量惯性角速度的可能性,并首次提出了理想化的有源腔系统结构方案,标志着有源谐振式布里渊光纤陀螺的诞生。此后国内外研究机构开展了大量关于布里渊光纤陀螺的研究,例如针对布里渊光纤陀螺的闭锁现象提出了多种方案以消除其影响。美国斯坦福大学 Huang 等<sup>[89]</sup> 通过在腔中引入光学抖动装置消除闭锁现象;德国 BGT 公司提出了双频布里渊环形激光陀螺的方案<sup>[90]</sup>。针对输出拍频信号不能给出陀螺旋转角速度方向的问题,日本东京大学 Hotate 教授<sup>[91]</sup> 提出了能够实现判向功能的方案。2019 年,美国 MagiQ Technologies 公司提出了一种基于光纤中 SBS 快慢光的新型光纤陀螺<sup>[92]</sup>,并详细分析了该陀螺的性能及主要误差来源。

国内对有源谐振式陀螺的研究起步较晚。北方交

通大学延凤平教授课题组<sup>[93-95]</sup>于 2000 年首次开展了有源谐振式光纤陀螺的研究工作,对其偏振特性<sup>[93]</sup>、温度影响<sup>[94]</sup>、阈值光功率<sup>[95]</sup>等特性做了深入的理论研究并进行了实验。2007 年起,哈尔滨工程大学李绪友教授课题组<sup>[96-102]</sup>重点研究了有源光纤谐振腔中光频率的稳定性<sup>[96-98]</sup>,提出了四频差动方案以解决闭锁问题<sup>[99]</sup>,并指出提高有源谐振式光纤陀螺性能的关键因素是环形激光器输出的稳定性、光学噪声误差、泵浦光源稳频及信号检测技术、陀螺低转速下的频率闭锁效应等<sup>[100-102]</sup>。

目前,由于几个关键问题尚未解决,布里渊式光纤陀螺尚未走向实用化。例如在实际工作中,环形谐振腔的腔长易受到温度和振动的影响,使谐振腔中泵浦光谐振状态稳定保持在最大光强下传输的技术不成熟,SBS 光功率稳定性较差等;又如缩短光纤谐振腔的长度将造成布里渊增益相对较弱、引起 SBS 所需的阈值较高。

随着集成光学技术、微纳光学加工技术和新型材料

的发展,基于谐振微腔的布里渊光学陀螺在陀螺整体尺寸、重量等方面有了极大的改进,而且由于微腔器件的高 Q 值、低传输损耗等光学特性,在微腔中产生 SBS 光的阈值较低。因此,研究基于微腔结构的布里渊光学陀螺在集成化、小型化、高灵敏度等方面具有优势。

### 3.2.1 基于 SiO<sub>2</sub> 与 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 微腔的集成化布里渊光学陀螺

布里渊微光学陀螺的工作原理与布里渊光纤陀螺相同,二者的核心区别在于敏感元件不同。微光学陀螺采用微环形谐振腔作为测量旋转角速度的核心部件,可以在极小体积下实现低 SBS 阈值,理论上可实现真正意义上的芯片级陀螺。常见的光学微腔主要包括法布里-珀罗腔、回音壁模式腔和光子晶体微腔<sup>[103-105]</sup>,其中回音壁模式腔是布里渊微光学陀螺谐振腔的主要形式,如图 8 所示。利用光的全内反射原理,将两束泵浦光及其激发出的反向传播的两束 SBS 光长时间限制在微腔中,通过检测顺逆时针 SBS 光的拍频信号实现角速度测量。

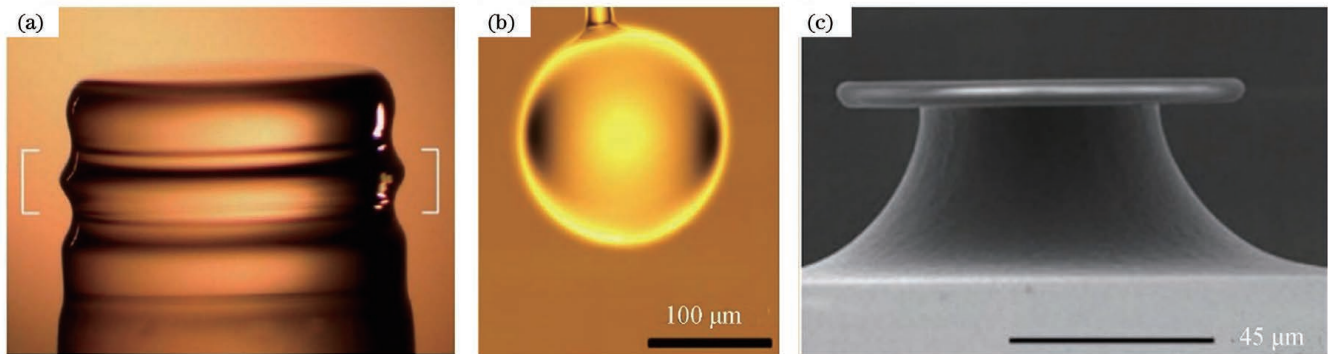


图 8 几种典型回音壁模式光学微腔。(a)微柱腔<sup>[106]</sup>; (b)微球腔<sup>[107]</sup>; (c)微环芯腔<sup>[68]</sup>

Fig. 8 Typical whispering gallery mode optical microcavities. (a) Microcolumn cavity<sup>[106]</sup>; (b) microspher cavity<sup>[107]</sup>; (c) microtoroid cavity<sup>[68]</sup>

加州理工学院 Vahala 教授课题组一直致力于微腔制备、微腔中布里渊效应及布里渊式微光学陀螺的研究。2012 年,该课题组研制出损耗仅为 0.08 dB/m 的 SiO<sub>2</sub> 片上微腔<sup>[108]</sup>,并研制出直径 7.5 mm、Q 值高达  $8.75 \times 10^8$  的 SiO<sub>2</sub> 楔形波导<sup>[8]</sup>。他们指出楔形腔作为微光学陀螺的核心敏感部件具有制造方法简单、微腔尺寸易控制、损耗低、Q 值高等优势,为后续研究基于该微腔的 SBS 奠定了基础。利用相同的制备方案,该团队成功利用直径约 6 mm 的 SiO<sub>2</sub> 片上微腔实现了 400 μW 的低阈值 SBS 激光输出,频率噪声低至  $0.06 \text{ Hz}^2/\text{Hz}$ ,与商用光纤激光器低频噪声相当并实现了 9 阶级联 SBS 激光输出<sup>[109]</sup>。2013 年,该课题组通过构建片上毫米微腔布里渊激光器产生 1~3 阶斯托克斯光,拍频产生了 21.7 GHz 高相干、低相位噪声的微波信号<sup>[110]</sup>,为研究基于 SiO<sub>2</sub> 微腔的布里渊微光学陀螺奠定了基础。2015 年 Loh 等<sup>[111]</sup>利用两个不同形状的 SiO<sub>2</sub> 微腔通过 SBS 产生波长  $1.55 \mu\text{m}$  的激光,在该微腔中频率噪声降至  $7.8 \times 10^{-14} \text{ Hz}^{-1/2}$ 。基

于以上研究,2017 年 Vahala 教授课题组的 Li 等<sup>[82]</sup>提出了一种级联式受激布里渊微光学陀螺仪,如图 9(a)所示。与传统布里渊光纤陀螺不同,该方案采用单泵浦源激发级联 SBS 激光。通过单向泵浦光激发生成一阶 SBS 光,继续增大泵浦功率直至一阶光功率增加到阈值点,进而产生与一阶光反向传播的二阶 SBS 光。这种级联过程可以持续产生多阶斯托克斯光,每次产生的斯托克斯光频率下移一个频移量,并相对于前一阶光反向传播。以这种级联方式产生的相邻阶斯托克斯光可产生 Sagnac 相移,非常适合陀螺应用。此外,由于相邻的斯托克斯光存在约 10 GHz 的频移,该布里渊陀螺中不存在闭锁效应。将谐振腔的自由光谱范围精确匹配布里渊频移量的整数倍,即可使各阶 SBS 光在腔中满足谐振条件。实验测得直径 18 mm 的谐振腔内一阶 SBS 阈值约为 250 μW,三阶 SBS 阈值为几毫瓦。反向传播的二阶和三阶斯托克斯光在光电探测器上进行拍频,产生亚赫兹线宽的微波,经过信号处理系统得出旋转角速度。该方案以 SiO<sub>2</sub> 回音壁

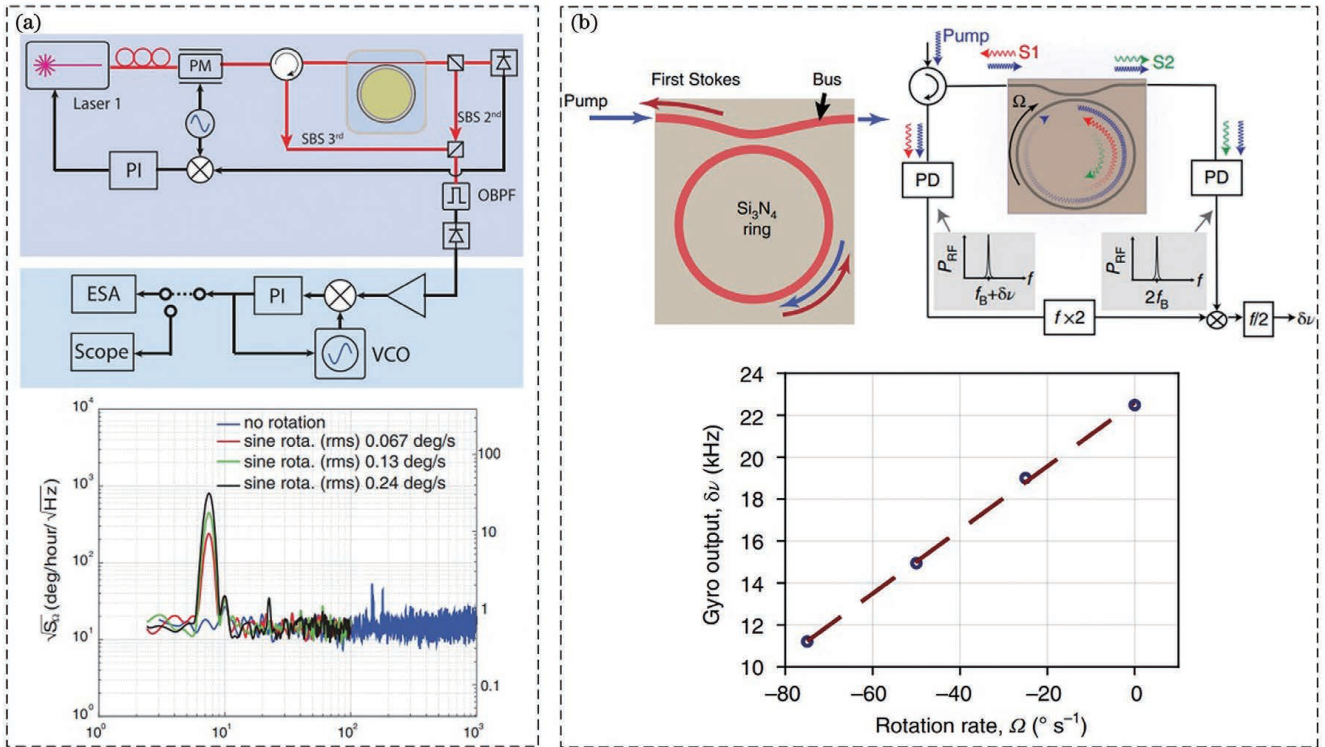


图 9 布里渊微光学陀螺。(a) SiO<sub>2</sub> 微腔布里渊集成光学陀螺仪<sup>[82]</sup>; (b) Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 波导集成光学陀螺仪<sup>[7]</sup>

Fig. 9 Micro optical gyroscope based on Brillouin scattering. (a) Optical gyroscope based on SBS with SiO<sub>2</sub> microcavity<sup>[82]</sup>; (b) optical gyroscope based on SBS with Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> waveguide<sup>[7]</sup>

模式谐振腔为核心传感单元,微腔的 Q 值达到  $1.26 \times 10^8$ ,通过采用锥形光纤耦合,在 3 Hz~1 kHz 带宽内陀螺灵敏度优于  $15^\circ / (\text{h} \cdot \sqrt{\text{Hz}})$ <sup>[83]</sup>,是传统微光学陀螺的 40 倍,开创了布里渊微光学陀螺实验研究的先河。

加利福尼亚大学自 2011 年起开展布里渊微光学陀螺相关器件的理论和实验研究。Bauters 等<sup>[112]</sup>于 2011 年提出一种硅片键合硅平面波导平台,采用晶圆结合的上覆层结构,实现传播损耗  $< 0.1 \text{ dB/m}$ 。2019 年, Gundavarapu 等<sup>[7]</sup>利用硅片键合硅平面波导平台制作 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 波导作为谐振腔,成功搭建集成化布里渊光学陀螺仪,如图 9(b)所示。该陀螺采用一阶光与二阶光拍频方案,在  $0^\circ/\text{s} \sim 75^\circ/\text{s}$  的范围内测量陀螺输出,标度因数约为  $152 \text{ Hz}/[^\circ \cdot \text{s}]$ ,验证了基于级联布里渊激光动力学理论建立的布里渊激光的增益、阈值、线宽等物理特性模型<sup>[113]</sup>的正确性。布里渊微光学陀螺的成功应用验证了采用硅片键合硅平面波导平台制作小尺寸、低成本和低功耗 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 波导及其他集成有源、无源器件的可行性,引领了低成本、可调谐、高相干布里渊激光器的发展方向,为基于 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 波导的布里渊微光学陀螺方案提供了思路。

2017 年, Honeywell 公司开始就基于级联 SBS 的微光学陀螺进行研究<sup>[114-115]</sup>,并于 2020 年提出一种基于 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 波导 SBS 的微光学陀螺<sup>[116]</sup>,指出该陀螺鲁棒性强且理论上可批量制造,当波导损耗小于

$0.05 \text{ dB/m}$  时,可实现角度随机游走低于  $0.01^\circ/\sqrt{\text{h}}$ ,适用于要求严苛的应用场景。目前 Honeywell 公司已经可以将 SiO<sub>2</sub>/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 波导的损耗降低至  $0.06 \text{ dB/m}$ ,随着加工技术的不断升级,有望实现高精度、强鲁棒性、集成化的布里渊微光学陀螺。除此之外, MagiQ Technologies<sup>[117]</sup>、英国国家物理实验室与德国 Max Planck 光学研究所<sup>[118]</sup>等单位也对基于 SBS 的光学陀螺进行了研究。

### 3.2.2 基于奇异点理论的集成化布里渊光学陀螺

基于 EP 的新型布里渊光学陀螺是实现集成化光学陀螺的一种新方案,与其他微光学陀螺相比,在高灵敏度传感探测领域具有极大的优势。EP 或者简并点是厄米系统与非厄米系统中的本质区别,在 EP 处,系统中多个本征值的实部和虚部同时分别相等,此时系统的本征值和本征态同时发生简并,会伴随能级排斥、交叉、相位突变等异常光学现象,而当远离 EP 时,系统的本征态完备正交。基于微扰理论,加入一定的微扰量可以解除 EP 的简并态,并且简并的本征谱线分裂程度与微扰量的大小有关。因此,通过研究微腔中 EP 附近的谱线分裂现象,可灵敏地探测外界的光学微扰信号,在高灵敏度光学传感与探测领域具有重要的应用价值。

2014 年,德国马格德堡大学的 Wiersig<sup>[119-120]</sup>基于 EP 简并状态下频率分裂的物理原理,首次提出了 EP 光学传感器方案,并通过理论建模,构建了回音壁模式的微腔传感器,将单粒子探测器的灵敏度提高了 7 倍,



成功验证了 EP 对能级谱线分裂的高灵敏度探测理论。2017 年, Wiersig 与华盛顿大学 Yang 团队合作, 借助 SiO<sub>2</sub> 微腔, 由 Chen 等<sup>[121]</sup>首次从实验上验证了 EP 可提高光学微腔的传感灵敏度, 如图 10(a) 所示。通过外加一个纳米粒子(微扰量)引起腔内 EP 附近的频率分裂, 由于谱线分裂的程度正比于扰动量的平方根, 因此相比传统的检测方案, 灵敏度有了很大提高。

2019 年, 基于 Wiersig 的理论预测, 加州理工学院 Vahala 课题组的 Lai 等<sup>[79]</sup>实验制备了 Q 值高达 10<sup>8</sup> 的 SiO<sub>2</sub> 楔形微腔, 通过双端耦合, 构建了单腔双光束相向传播的陀螺结构, 其结构如图 10(b) 所示。为更好地理解 EP 对布里渊微光学陀螺探测灵敏度的提高, 详细建立了基于非厄米系统中 EP 的哈密顿模型<sup>[81,83]</sup>:

$$H_0 = \begin{pmatrix} \omega_0 + i[g_1 |A_1|^2 - \gamma/2] & i\chi \\ i\chi & \omega_0 + i[g_2 |A_2|^2 - \gamma/2] \end{pmatrix}, \quad (7)$$

式中:  $\gamma$  表示微腔阻尼率;  $g_i (i=1,2)$  为布里渊增益因子;  $\omega_0$  是腔的泵浦频率;  $\chi$  为耦合系数;  $A_i (i=1,2)$  为

归一化的光强度幅值。

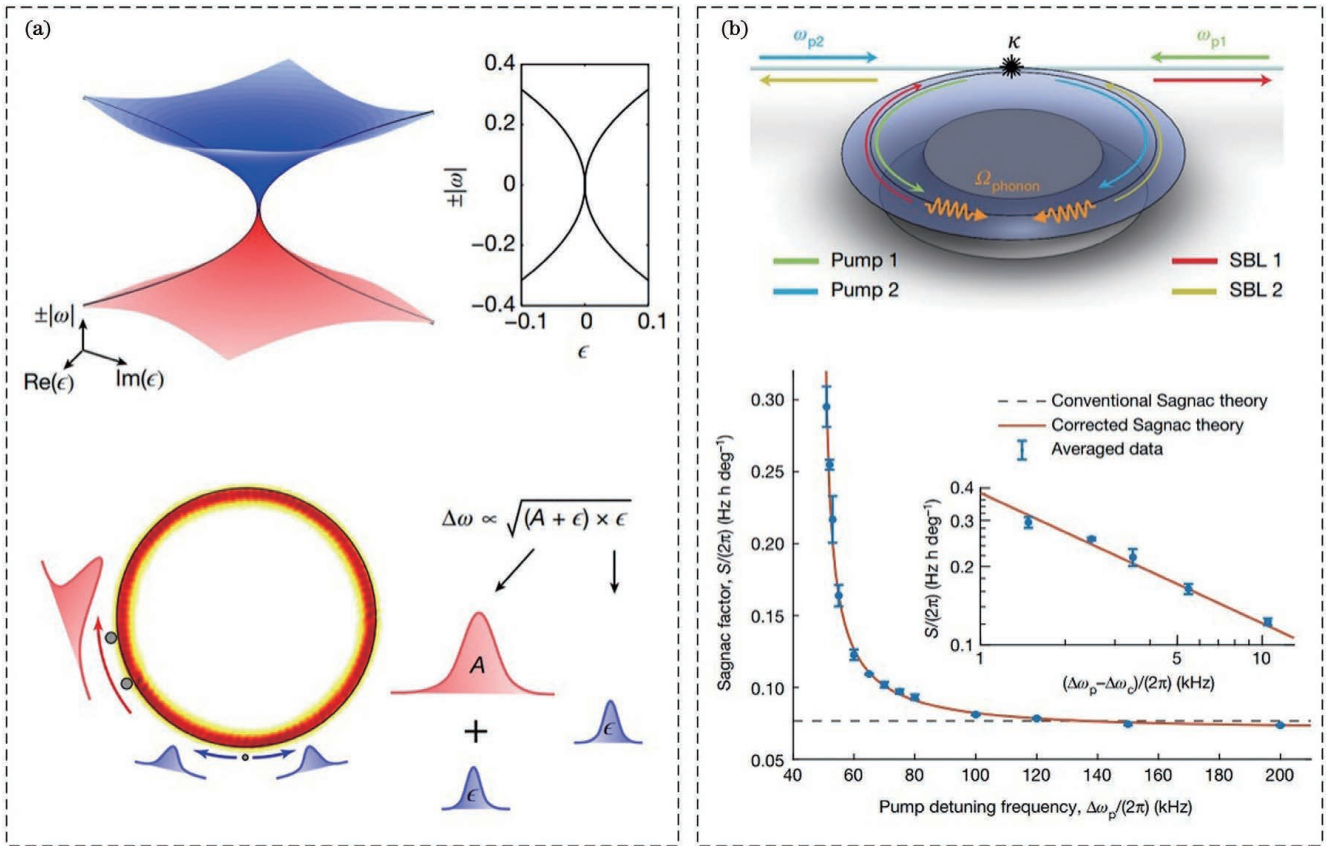


图 10 基于 EP 的光学陀螺。(a) EP 增强光的传感灵敏度<sup>[121]</sup>; (b) 基于 EP 的布里渊微光学陀螺<sup>[79]</sup>

Fig. 10 Brillouin optical gyroscope based on EP. (a) Enhanced sensitivity via EP<sup>[121]</sup>; (b) Brillouin micro optical gyroscope based on EP<sup>[79]</sup>

理论计算得出, 在 EP 附近陀螺旋转引起频率分裂, 进而引起两束 SBS 激光的拍频结果发生变化<sup>[79]</sup>, 表达如下:

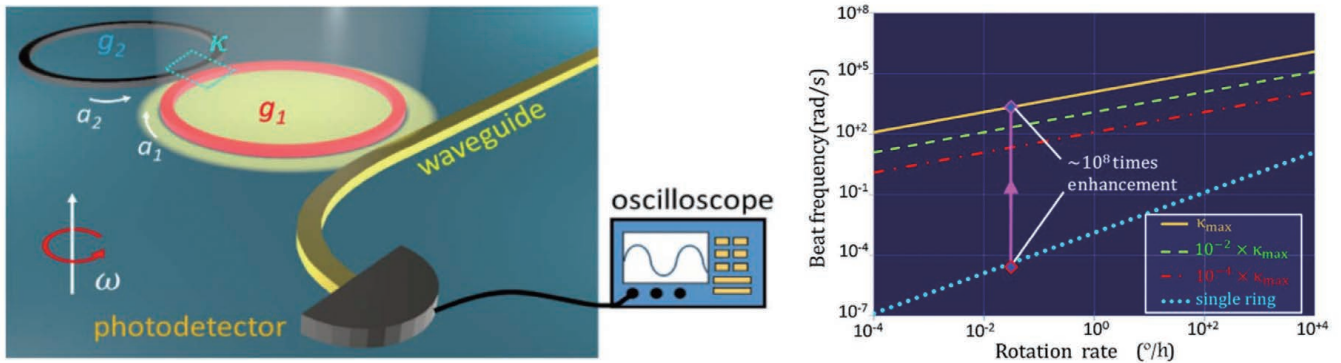
$$\Delta\omega_s = \frac{\sigma/\Gamma}{1 + \sigma/\Gamma} \cdot \sqrt{[\Delta\omega_p + \Gamma \cdot \Omega/\sigma]^2 - \Delta\omega_c^2}, \quad (8)$$

式中:  $\sigma$  表征能量损耗率;  $\Gamma$  为布里渊增益谱宽;  $\Delta\omega_p$  为两束泵浦光的频率失谐量;  $\Delta\omega_c$  表示系统处于 EP 处的临界泵浦光频率失谐量;  $\Omega$  即待测系统角速度。

由图 10(b) 可见, 与传统的 Sagnac 效应相比, 基于 EP 的微光学陀螺在低频转速探测领域具有极高的

灵敏度。Vahala 课题组还详细分析了在 EP 处陀螺的角速度随机游走、偏置漂移等性能<sup>[80,83,122]</sup>。

2017 年, 美国中佛罗里达大学 Ren 等<sup>[81]</sup>通过设计另外一种结构——宇称时间(PT)对称的环形耦合微腔, 提出了基于 EP 理论的超高灵敏度微光学陀螺的设计方案, 如图 11 所示。该微腔结构由一对可耦合的环形腔及耦合直波导组成, 其中两个环形波导中光的传输方向相反, 当陀螺转动时, EP 附近的频率简并状态发生改变, 对应微腔中本征模式的变化, 相应的 Sagnac 频移量经直波导耦合输出到探测器进行拍频

图 11 PT 对称结构的激光陀螺系统示意图<sup>[81]</sup>Fig. 11 Schematic of a PT-symmetric laser gyroscope system<sup>[81]</sup>

检测,从而获得陀螺的转速信息。该研究从理论上证明陀螺旋转引起的频率分裂与转速的平方根成正比 ( $\Delta\omega_{PT} \approx 2\sqrt{|\Delta\omega_s \kappa|}$ ),因此可提高系统在低转速工作时的灵敏度。同时,他们从理论上指出基于 PT 结构的微陀螺的极限灵敏度与环形微腔的半径无关,为片上集成高灵敏度光学陀螺的发展提供了便利条件。2017 年, Sunada<sup>[123]</sup>也从理论上证明了光学陀螺仪在 EP 处的频率分裂增强,并以周期结构环形腔为例,仿真获得了高于传统环形腔两个以上数量级的频率分裂量。但是,基于 PT 结构的高灵敏度微光学陀螺尚未有明确的实验验证。

EP 理论的提出和实验验证为高灵敏度集成光学陀螺的研究开辟了新的道路。由于其传感原理是基于非厄米系统中 EP 简并态的频率分裂特性,因此在微弱信号检测领域具有较大的优势。目前,基于 EP 的片上集成光学陀螺仍处于研究的前期阶段,结构上主要由回音壁微腔或者 PT 对称结构实现,其中基于回音壁结构的片上集成布里渊光学陀螺已经实现对地球转速的测量,而 PT 对称结构的高灵敏度传感实验仍有待进一步研究。

## 4 结束语

本文从 SBS 效应及基于 SBS 的光学陀螺原理出发,综述了不同介质中 SBS 在窄线宽激光器领域的应用,以及在此基础上衍生出的光学陀螺的研究进展。

SBS 增益系数、频移量、谱宽等性质随介质的不同而存在较大差异。高压气体对气室密封性要求严苛,液体吸收系数高、化学结构不稳定,这些因素限制了流体介质在布里渊光学陀螺中的应用。光纤和微腔具有稳定性好、光传播损耗较低、安全性高等特点,适合作为布里渊光学陀螺谐振腔的介质。随着产业对光学陀螺在小尺寸、轻质化、超高灵敏度等方面的要求的不断提高,以及微纳加工技术、光学集成平台的发展,布里渊集成化光学陀螺的优势逐渐显现,成为当前国内外研究的前沿方向。相较于布里渊光纤陀螺,其优势主要体现在:(1)集成化光学陀螺尺寸极小,可在毫米级

芯片波导上形成谐振腔;(2)微腔 Q 值高,模场体积小,限制光能力极强,SBS 阈值远低于光纤;(3)微纳加工技术成熟后可实现布里渊集成光学陀螺批量化制造,缩减制备时间,降低成本;(4)基于 EP 理论的光学陀螺具有在低速下超高灵敏度的独特优势。这使得基于 SBS 的集成化光学陀螺具有很大的发展前景,成为未来陀螺发展的重要方向。

目前集成化光学陀螺在理论和实际应用中仍存在诸多挑战<sup>[124-125]</sup>:(1)高 Q 值、低损耗微腔制作难度较大,工艺复杂且成本较高;(2)由于其具有超高灵敏度的特性,光学微腔的波长敏感性较高,对稳频系统的实时性、准确性以及信号与噪声的辨别系统要求高;(3)耦合损耗较高,泵浦光能量转移至 SBS 光的效率较低;(4)如何将静止系统稳定在 EP、应对外部噪声扰动以及分辨出极小的频率分裂量等仍需研究。

总而言之,随着微腔等器件制备工艺的不断成熟以及对片上集成 SBS 激光器研究的不断深入,基于 SBS 的集成化光学陀螺是实现低成本、微型化、高灵敏度光学陀螺的有效方案,将在卫星定位、自动驾驶、无人机等先进导航领域实现其应用意义和市场价值。

## 参 考 文 献

- [1] Chiao R Y, Townes C H, Stoicheff B P. Stimulated Brillouin scattering and coherent generation of intense hypersonic waves [J]. *Physical Review Letters*, 1964, 12(21): 592-595.
- [2] Kang M S, Nazarkin A, Brenn A, et al. Tightly trapped acoustic phonons in photonic crystal fibres as highly nonlinear artificial Raman oscillators [J]. *Nature Physics*, 2009, 5(4): 276-280.
- [3] Dainese P, Russell P S J, Joly N, et al. Stimulated Brillouin scattering from multi-GHz-guided acoustic phonons in nanostructured photonic crystal fibres [J]. *Nature Physics*, 2006, 2(6): 388-392.
- [4] Grudinin I S, Matsko A B, Maleki L. Brillouin lasing with a CaF<sub>2</sub> whispering gallery mode resonator [J]. *Physical Review Letters*, 2009, 102(4): 043902.
- [5] Tomes M, Carmon T. Photonic micro-electromechanical systems vibrating at X-band (11-GHz) rates [J]. *Physical Review Letters*, 2009, 102(11): 113601.
- [6] Yang K Y, Oh D Y, Lee S H, et al. Bridging ultrahigh-Q devices and photonic circuits [J]. *Nature Photonics*, 2018, 12(5): 297-302.

- [7] Gundavarapu S, Brodnik G M, Puckett M, et al. Sub-hertz fundamental linewidth photonic integrated Brillouin laser[J]. *Nature Photonics*, 2019, 13(1): 60-67.
- [8] Lee H, Chen T, Li J, et al. Chemically etched ultrahigh-Q wedge-resonator on a silicon chip[J]. *Nature Photonics*, 2012, 6(6): 369-373.
- [9] Pant R, Poulton C G, Choi D Y, et al. On-chip stimulated Brillouin scattering[J]. *Optics Express*, 2011, 19(9): 8285-8290.
- [10] Shin H, Cox J A, Jarecki R, et al. Control of coherent information via on-chip photonic-phononic emitter-receivers[J]. *Nature Communications*, 2015, 6: 6427.
- [11] van Laer R, Kuyken B, van Thourhout D, et al. Interaction between light and highly confined hypersound in a silicon photonic nanowire[J]. *Nature Photonics*, 2015, 9(3): 199-203.
- [12] Hagenlocker E E, Rado W G. Stimulated Brillouin and Raman scattering in gases[J]. *Applied Physics Letters*, 1965, 7(9): 236-238.
- [13] Yang F, Gyger F, Thevenaz L. Giant Brillouin amplification in gas using hollow-core waveguides[C]//Conference on Lasers and Electro-Optics, May 10-15, 2020, Washington, DC. Washington, D.C.: Optica Publishing Group, 2020: SF2P.1.
- [14] She C Y, Herring G C, Moosmüller H, et al. Stimulated Rayleigh-Brillouin gain spectroscopy in pure gases[J]. *Physical Review Letters*, 1983, 51(18): 1648.
- [15] Manteghi A, Dam N J, Meijer A S, et al. Spectral narrowing in coherent Rayleigh-Brillouin scattering[J]. *Physical Review Letters*, 2011, 107(17): 173903.
- [16] Mountain R D. Spectral distribution of scattered light in a simple fluid[J]. *Reviews of Modern Physics*, 1966, 38(1): 205-214.
- [17] Dahan R, Martin L L, Carmon T. Droplet optomechanics[J]. *Optica*, 2016, 3(2): 175-178.
- [18] Shi C D, Sheng Q, Fu S J, et al. Power scaling and spectral linewidth suppression of hybrid Brillouin/thulium fiber laser[J]. *Optics Express*, 2020, 28(3): 2948-2955.
- [19] Huang Y L, Li Q, Han J Y, et al. Temporal soliton and optical frequency comb generation in a Brillouin laser cavity[J]. *Optica*, 2019, 6(12): 1491-1497.
- [20] Zhu K Y, He J Y, Chang K, et al. The multi-wavelength Brillouin laser based on highly nonlinear fiber[J]. *Proceedings of SPIE*, 2022, 12169: 1216935.
- [21] Tehranchi A, Kashyap R. Theoretical investigations of power fluctuations statistics in Brillouin erbium-doped fiber lasers[J]. *Optics Express*, 2019, 27(26): 37508-37515.
- [22] Okawa Y, Yamashita R K, Kishi M, et al. Analysis of Brillouin dynamic grating localized by intensity-modulated correlation-domain technique for distributed fiber sensing[J]. *Optics Express*, 2020, 28(5): 6981-6994.
- [23] Qiu L Q, Chu Q, Li T F, et al. Dynamic distributed Brillouin optical fiber pressure sensor[J]. *Proceedings of SPIE*, 2021, 11850: 118500F.
- [24] Wu J F, Puckett M W, Tin S. Stimulated Brillouin scattering gyroscope: US20210180953[P]. 2021-06-17.
- [25] Minardo A, Zeni L, Coscetta A, et al. Distributed optical fiber sensor applications in geotechnical monitoring[J]. *Sensors*, 2021, 21(22): 7514.
- [26] Qian K, Wang F, Wang R, et al. Enhanced sensitivity of fiber laser sensor with Brillouin slow light[J]. *Optics Express*, 2019, 27(18): 25485-25492.
- [27] Sharma D K, Tripathi S M. Optical performance of tellurite glass microstructured optical fiber for slow-light generation assisted by stimulated Brillouin scattering[J]. *Optical Materials*, 2019, 94: 196-205.
- [28] 王巍. 干涉型光纤陀螺仪技术[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2010: 46-48.
- Wang W. Interferometric fiber optic gyroscope technology [M]. Beijing: China Astronautic Publishing House, 2010: 46-48.
- [29] Eggleton B J, Poulton C G, Rakich P T, et al. Brillouin integrated photonics[J]. *Nature Photonics*, 2019, 13(10): 664-677.
- [30] Damzen M J, Vlad V, Mocofanescu A, et al. Stimulated Brillouin scattering: fundamentals and applications[M]. Boston: CRC Press, 2003: 89-92.
- [31] Ippen E P, Stolen R H. Stimulated Brillouin scattering in optical fibers[J]. *Applied Physics Letters*, 1972, 21(11): 539-541.
- [32] Gyger F. Brillouin scattering in gas-filled hollow-core fibres[D]. Lausanne: École Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2020: 153-158.
- [33] Yang F, Gyger F, Thévenaz L. Intense Brillouin amplification in gas using hollow-core waveguides[J]. *Nature Photonics*, 2020, 14(11): 700-708.
- [34] Rank D H, Wiggins T A, Wick R V, et al. Stimulated Brillouin effect in high-pressure gases[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1966, 56(2): 174-175.
- [35] 汤秀章, 姚刚, 王孝君. KrF 激光在 SF<sub>6</sub> 气体中受激布里渊散射的研究[J]. *强激光与粒子束*, 1995, 7(2): 283-287.
- Tang X Z, Yao G, Wang X J. Investigation of stimulated Brillouin scattering of KrF laser in SF<sub>6</sub> gas[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 1995, 7(2): 283-287.
- [36] 葛传文, 张为俊, 王沛, 等. 介质化学纯度影响受激布里渊散射的实验研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2000, 37(4): 18-22.
- Ge C W, Zhang W J, Wang P, et al. Influence of scatter medium purity on backward SBS light[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2000, 37(4): 18-22.
- [37] Bai Z X, Yuan H, Liu Z H, et al. Stimulated Brillouin scattering materials, experimental design and applications: a review[J]. *Optical Materials*, 2018, 75: 626-645.
- [38] 哈斯乌力吉, 吕志伟, 何伟明. 受激布里渊散射(SBS)中的三类介质[J]. *激光杂志*, 2003, 24(4): 8-10.
- Hasi W L J, Lü Z W, He W M. Three kinds of stimulated Brillouin scattering media[J]. *Laser Journal*, 2003, 24(4): 8-10.
- [39] Brewer R G, Rieckhoff K E. Stimulated Brillouin scattering in liquids[J]. *Physical Review Letters*, 1964, 13(11): 334-336.
- [40] 许锦, 郭洋宁, 罗宁宁, 等. 水体温度对受激布里渊散射时间相干性的影响[J]. *光学学报*, 2020, 40(9): 0929001.
- Xu J, Guo Y N, Luo N N, et al. Influence of water temperature on temporal coherence of stimulated Brillouin scattering[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(9): 0929001.
- [41] Park H, Lim C, Yoshida H, et al. Measurement of stimulated Brillouin scattering characteristics in heavy fluorocarbon liquids and perfluoropolyether liquids[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2006, 45(6A): 5073-5075.
- [42] 许锦, 郭洋宁, 罗宁宁, 等. 水体参数对受激布里渊散射阈值及增益的影响[J]. *物理学报*, 2021, 70(15): 154205.
- Xu J, Guo Y N, Luo N N, et al. Influence of water parameters on threshold value and gain coefficient of stimulated Brillouin scattering[J]. *Acta Physica Sinica*, 2021, 70(15): 154205.
- [43] Lü Z W, Lü Y L, Yang J Y. Optical limiting effect based on stimulated Brillouin scattering in CCl<sub>4</sub>[J]. *Chinese Physics*, 2003, 12(5): 507-513.
- [44] 刘娟, 白建辉, 倪恺, 等. 受激布里渊散射对激光在水中衰减特性的影响[J]. *物理学报*, 2008, 57(1): 260-264.
- Liu J, Bai J H, Ni K, et al. Attenuation characteristics of laser beam in water[J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, 57(1): 260-264.
- [45] Hasi W L J, Lu Z W, Gong S, et al. Investigation of stimulated Brillouin scattering media perfluoro-compound and perfluoropolyether with a low absorption coefficient and high power-load ability[J]. *Applied Optics*, 2008, 47(7): 1010-1014.
- [46] He X, Harris G I, Baker C G, et al. Strong optical coupling

- through superfluid Brillouin lasing[J]. *Nature Physics*, 2020, 16(4): 417-421.
- [47] 刘莉, 吕志伟, 何伟明, 等. 单池受激布里渊散射脉冲波形的研究[J]. *中国激光*, 2000, 27(1): 53-58.  
Liu L, Lü Z W, He W M, et al. Study of SBS pulse waveform in a one-cell system[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2000, 27(1): 53-58.
- [48] 魏晓峰, 袁晓东, 丁磊, 等. 利用受激布里渊散射脉冲压缩效应获得高功率激光输出[J]. *强激光与粒子束*, 1999, 11(2): 129-133.  
Wei X F, Yuan X D, Ding L, et al. Research on the high power laser output using stimulated Brillouin scattering pulse compression[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 1999, 11(2): 129-133.
- [49] 哈斯乌力吉, 吕志伟, 何伟明, 等. 利用不同介质进行布里渊放大的研究[J]. *物理学报*, 2005, 54(2): 742-748.  
Hasi W L J, Lü Z W, He W M, et al. Study on Brillouin amplification in different liquid media[J]. *Acta Physica Sinica*, 2005, 54(2): 742-748.
- [50] Shi J L, Xu J, Guo Y N, et al. Dependence of stimulated Brillouin scattering in water on temperature, pressure, and attenuation coefficient[J]. *Physical Review Applied*, 2021, 15(5): 054024.
- [51] Barocchi F, Mancini M, Vallauri R. Stimulated Brillouin scattering in liquid mixtures (hypersonic-velocity measurements as a function of concentration)[J]. *Il Nuovo Cimento B (1965-1970)*, 1967, 49(2): 233-236.
- [52] Yoshida H, Kmetik V, Fujita H, et al. Heavy fluorocarbon liquids for a phase-conjugated stimulated Brillouin scattering mirror[J]. *Applied Optics*, 1997, 36(16): 3739-3744.
- [53] Bowers M W, Boyd R W. Phase locking via Brillouin-enhanced four-wave-mixing phase conjugation [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1998, 34(4): 634-644.
- [54] 廉玉东, 王禹贺, 章雨琴, 等. 受激布里渊散射脉冲压缩技术研究进展[J]. *强激光与粒子束*, 2021, 33(5): 051001.  
Lian Y D, Wang Y H, Zhang Y Q, et al. Research progress of stimulated Brillouin scattering pulse compression technique[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2021, 33(5): 051001.
- [55] Bai Z X, Wang Y L, Lu Z W, et al. High compact, high quality single longitudinal mode hundred picoseconds laser based on stimulated Brillouin scattering pulse compression[J]. *Applied Sciences*, 2016, 6(1): 29.
- [56] Liu H X, Li Y L, Yang C, et al. 1.35 ns SBS laser pulse[J]. *Optik*, 2019, 184: 394-398.
- [57] 尹韬策. 面向气体探测应用的窄线宽光纤激光器研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2020: 71-75.  
Yin T C. Study on narrow-linewidth fiber lasers for gas detection applications [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2020: 71-75.
- [58] Wang Y Y, Xu L L, Jiang L, et al. Power threshold reduction and laser efficiency improvement of Brillouin fiber laser based on an  $As_2S_3$  chalcogenide fiber via a mode field adaptor[J]. *Optics Communications*, 2021, 484: 126678.
- [59] Abedin K S. Stimulated Brillouin scattering in single-mode tellurite glass fiber[J]. *Optics Express*, 2006, 14(24): 11766-11772.
- [60] Deroh M, Sylvestre T, Chretien J, et al. Towards athermal Brillouin strain sensing based on heavily germania-doped core optical fibers[J]. *APL Photonics*, 2019, 4(3): 030801.
- [61] Liao M S, Yan X, Qin G S, et al. A highly non-linear tellurite microstructure fiber with multi-ring holes for supercontinuum generation[J]. *Optics Express*, 2009, 17(18): 15481-15490.
- [62] Habib M S, Habib M S, Hasan M I, et al. Highly nonlinear polarization maintaining two zero dispersion spiral photonic crystal fiber using artificial defects[J]. *Optical Fiber Technology*, 2013, 19(6): 539-542.
- [63] Habib M S, Habib M S, Hasan M I, et al. Polarization maintaining large nonlinear coefficient photonic crystal fibers using rotational hybrid cladding[J]. *Optik*, 2014, 125(3): 1011-1015.
- [64] Amin M N, Faisal M. Highly nonlinear polarization-maintaining photonic crystal fiber with nanoscale GaP strips[J]. *Applied Optics*, 2016, 55(35): 10030-10037.
- [65] Zhao T T, Lian Z G, Benson T, et al. Highly-nonlinear polarization-maintaining  $As_2Se_3$ -based photonic quasi-crystal fiber for supercontinuum generation[J]. *Optical Materials*, 2017, 73: 343-349.
- [66] Finazzi V, Monro T M, Richardson D J. Confinement loss in highly nonlinear holey optical fibres[C]//*Optical Fiber Communication Conference and Exhibit*, March 17-22, 2002, Anaheim, CA, USA. New York: IEEE Press, 2002: 524-525.
- [67] Cherif R, Zghal M, Tartara L. Characterization of stimulated Brillouin scattering in small core microstructured chalcogenide fiber[J]. *Optics Communications*, 2012, 285(3): 341-346.
- [68] Vahala K J. Optical microcavities [J]. *Nature*, 2003, 424(6950): 839-846.
- [69] Xu W, Xu C X, Qin F F, et al. Whispering-gallery mode lasing from polymer microsphere for humidity sensing [J]. *Chinese Optics Letters*, 2018, 16(8): 081401.
- [70] 杨煜, 赵帅, 沈远, 等. 基于超高 Q 值封装  $CaF_2$  晶体盘腔的级联受激布里渊散射光产生[J]. *红外与毫米波学报*, 2021, 40(6): 865-869.  
Yang Y, Zhao S, Shen Y, et al. Generation of stimulated Brillouin scattering in a packed  $CaF_2$  micro-disk resonator with ultra-high-Q factor [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2021, 40(6): 865-869.
- [71] Pant R, Byrnes A, Poulton C G, et al. Photonic chip based tunable slow and fast light via stimulated Brillouin scattering [J]. *Optics Letters*, 2012, 37(5): 969-971.
- [72] Su X X, Dou Z L, Lee H P. Stimulated Brillouin scattering in a sub-wavelength anisotropic waveguide with slightly-misaligned material and structural axes: misalignment-sensitive behaviors and underlying physics [J]. *Journal of Optics*, 2022, 24(4): 045002.
- [73] Su X X, Li X S, Wang Y S, et al. Theoretical study on the stimulated Brillouin scattering in a sub-wavelength anisotropic waveguide: acousto-optical coupling coefficients and effects of transverse anisotropies [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2017, 34(12): 2599-2609.
- [74] Marpaung D, Morrison B, Pagani M, et al. Low-power, chip-based stimulated Brillouin scattering microwave photonic filter with ultrahigh selectivity[J]. *Optica*, 2015, 2(2): 76-83.
- [75] Chauhan N, Isichenko A, Liu K K, et al. Visible light photonic integrated Brillouin laser [J]. *Nature Communications*, 2021, 12: 4685.
- [76] Cheng T L, Liao M S, Gao W Q, et al. Suppression of stimulated Brillouin scattering in all-solid chalcogenide-tellurite photonic bandgap fiber [J]. *Optics Express*, 2012, 20(27): 28846-28854.
- [77] Yan J, Wang D N, Li X. An erbium-doped whispering-gallery-mode microlaser for sensing [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2021, 39(15): 5177-5182.
- [78] Mondragón-Ochoa J S, José G R, Cigdem T, et al. Microwave-assisted *in situ* laser dye incorporation into high sensitivity whispering gallery mode microresonators [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2022, 55(5): 055101.
- [79] 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.
- [80] Wang H M, Lai Y H, Yuan Z Q, et al. Petermann-factor sensitivity limit near an exceptional point in a Brillouin ring laser gyroscope[J]. *Nature Communications*, 2020, 11: 1610.
- [81] 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.

- [82] Li J, Suh M G, Vahala K. Microresonator Brillouin gyroscope [J]. *Optica*, 2017, 4(3): 346-348.
- [83] 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.
- [84] Shen Z. Brillouin-scattering-induced transparency and non-reciprocal light storage [M]//Experimental research of cavity optomechanics. Springer theses. Singapore: Springer, 2021: 65-80.
- [85] Cheng M T, Ye G L, Zong W W, et al. Single photon scattering in a pair of waveguides coupled by a whispering-gallery resonator interacting with a semiconductor quantum dot [J]. *Chinese Physics Letters*, 2016, 33(2): 024205.
- [86] Meng H, Eichler H J. Nd:YAG laser with a phase-conjugating mirror based on stimulated Brillouin scattering in SF<sub>6</sub> gas[J]. *Optics Letters*, 1991, 16(8): 569-571.
- [87] 王天齐, 康治军, 孟冬冬, 等. 受激布里渊散射相位共轭镜在高功率纳秒激光器中的应用进展[J]. *红外与激光工程*, 2021, 50(5): 20211024.  
Wang T Q, Kang Z J, Meng D D, et al. Application progress of the stimulated Brillouin scattering phase conjugate mirror in high power nanosecond lasers [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(5): 20211024.
- [88] Thomas P J, van Driel H M, Stegeman G I. Possibility of using an optical fiber Brillouin ring laser for inertial sensing[J]. *Applied Optics*, 1980, 19(12): 1906-1908.
- [89] Huang S Y, Toyama K, Nicati P A, et al. Brillouin fiber optic gyro with push-pull phase modulator and synthetic heterodyne detection[J]. *Proceedings of SPIE*, 1993, 1795: 48-59.
- [90] Raab M, Quast T. Two-color Brillouin ring laser gyro with gyro-compassing capability[J]. *Optics Letters*, 1994, 19(18): 1492-1494.
- [91] Hotate K. Development of fiber-optic gyros and technologies for next generation [J]. *The Review of Laser Engineering*, 1998, 26(4): 297-303.
- [92] Christensen C A, Liu Y Y, Yahalom R, et al. A ring laser gyro with fast light and slow light based on stimulated Brillouin scattering in fiber [J]. *Proceedings of SPIE*, 2019, 10934: 109340S.
- [93] 延凤平, 单英, 简水生. 受激布里渊散射光纤陀螺中光偏振特性的研究[J]. *中国激光*, 2001, 28(10): 913-917.  
Yan F P, Shan Y, Jian S S. Study on polarization property in stimulated Brillouin scattering fiber optic gyros (SBS-FOG) [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2001, 28(10): 913-917.
- [94] 延凤平, 单英, 简水生. 受激布里渊散射光纤陀螺温度效应的理论分析[J]. *压电与声光*, 2001, 23(2): 97-99.  
Yan F P, Shan Y, Jian S S. Theoretical analysis of thermal effect for the stimulated Brillouin scattering fiber optic gyros [J]. *Piezoelectrics & Acoustooptics*, 2001, 23(2): 97-99.
- [95] 延凤平, 单英, 简水生. 受激布里渊散射光纤陀螺中光纤光源的阈值光功率研究[J]. *中国激光*, 2000, 27(9): 790-794.  
Yan F P, Shan Y, Jian S S. Study on threshold power of the fiber source for the stimulated Brillouin scattering fiber optic gyros (SBS-FOG) [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2000, 27(9): 790-794.
- [96] 张勇. 布里渊光纤陀螺有源腔关键技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2009: 11-12.  
Zhang Y. Research on BFOG and Brillouin fiber ring resonator [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2009: 11-12.
- [97] 李绪友, 张勇, 王瑞, 等. 布里渊光纤陀螺光纤环形腔研究[J]. *光电工程*, 2008, 35(11): 111-116.  
Li X Y, Zhang Y, Wang R, et al. Optical fiber ring resonator based on Brillouin fiber optic gyro [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2008, 35(11): 111-116.
- [98] 张勇. 布里渊光纤陀螺环形腔设计与拍频分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2008: 9-11.  
Zhang Y. Beat frequency analysis and fiber ring resonator design for B-FOG[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2008: 9-11.
- [99] 崇学庆. 四频差动布里渊光纤陀螺方案及其光源稳频技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2007: 9-10.  
Chong X Q. Research on four-mode differential Brillouin fiber-optic gyroscope and its laser's frequency stable technology[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2007: 9-10.
- [100] 李绪友, 何周, 张勇, 等. 受激布里渊光纤陀螺拍频稳定性[J]. *中国惯性技术学报*, 2010, 18(3): 338-342.  
Li X Y, He Z, Zhang Y, et al. Beat frequency stability of stimulated Brillouin fiber gyroscope [J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2010, 18(3): 338-342.
- [101] 何周. 布里渊型光纤陀螺关键问题研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2011: 10-11.  
He Z. Research on the key technologies of Brillouin fiber optic gyroscope[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2011: 10-11.
- [102] 洪伟, 李绪友, 杨汉瑞, 等. 布里渊光纤陀螺增大动态范围新方案[J]. *中国惯性技术学报*, 2011, 19(1): 106-110.  
Hong W, Li X Y, Yang H R, et al. New scheme of increasing dynamic range of Brillouin fiber optic gyroscope[J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2011, 19(1): 106-110.
- [103] Liu Y, Lang C P, Wei X C, et al. Strain force sensor with ultra-high sensitivity based on fiber inline Fabry-Perot micro-cavity plugged by cantilever taper[J]. *Optics Express*, 2017, 25(7): 7797-7806.
- [104] Kuo P S, Bravo-Abad J, Solomon G S. Second-harmonic generation using quasi-phaseshifting in a GaAs whispering-gallery-mode microcavity[J]. *Nature Communications*, 2014, 5: 3109.
- [105] 张雅彤. 基于回音壁模式微腔光学特性的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020: 38-40.  
Zhang Y T. Study on the optical properties of microcavity based on whispering gallery mode [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020: 38-40.
- [106] Grudinin I S, Ilchenko V S, Maleki L. Ultrahigh optical Q factors of crystalline resonators in the linear regime [J]. *Physical Review A*, 2006, 74(6): 063806.
- [107] Li A Z, Yu J B, Zhang M, et al. An Yb<sup>3+</sup>-Ho<sup>3+</sup> codoped glass microsphere laser in the 2.0 μm wavelength regions[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2018, 30(17): 1543-1546.
- [108] Lee H, Chen T, Li J, et al. Ultra-low-loss optical delay line on a silicon chip[J]. *Nature Communications*, 2012, 3: 867.
- [109] Li J, Lee H, Chen T, et al. Characterization of a high coherence, Brillouin microcavity laser on silicon [J]. *Optics Express*, 2012, 20(18): 20170-20180.
- [110] Li J, Lee H, Vahala K J. Microwave synthesizer using an on-chip Brillouin oscillator[J]. *Nature Communications*, 2013, 4: 2097.
- [111] Loh W, Green A A S, Baynes F N, et al. Dual-microcavity narrow-linewidth Brillouin laser [J]. *Optica*, 2015, 2(3): 225-232.
- [112] Bauters J F, Heck M J R, John D D, et al. Planar waveguides with less than 0.1 dB/m propagation loss fabricated with wafer bonding[J]. *Optics Express*, 2011, 19(24): 24090-24101.
- [113] Behunin R O, Otterstrom N T, Rakich P T, et al. Fundamental noise dynamics in cascaded-order Brillouin lasers [J]. *Physical Review A*, 2018, 98(2): 023832.
- [114] Salit M K, Wu J F, Qiu T Q. Single pump cascaded stimulated Brillouin scattering (SBS) ring laser gyro: US9733084 [P]. 2017-08-15.
- [115] Salit M K, Wu J F, Qiu T Q. Stimulated Brillouin scattering (SBS) gyro with coupled resonator for frequency-dependent output coupling: US9772187 [P]. 2017-09-26.
- [116] Nelson K D, Puckett M W, Wu J F. A ring-laser gyro based on stimulated Brillouin scattering in silicon nitride waveguides [C]//2020 IEEE Research and Applications of Photonics in Defense Conference (RAPID), August 10-12, 2020, Miramar Beach, FL, USA. New York: IEEE Press, 2020.

- [117] Christensen C A, Zavriyev A, Cummings M, et al. Compact, highly sensitive optical gyros and sensors with fast-light [J]. Proceedings of SPIE, 2015, 9616: 96160N.
- [118] Silver J M, del Bino L, Woodley M T M, et al. Nonlinear enhanced microresonator gyroscope [J]. Optica, 2021, 8(9): 1219-1226.
- [119] Wiersig J. Enhancing the sensitivity of frequency and energy splitting detection by using exceptional points: application to microcavity sensors for single-particle detection [J]. Physical Review Letters, 2014, 112(20): 203901.
- [120] Wiersig J. Sensors operating at exceptional points: general theory [J]. Physical Review A, 2016, 93(3): 033809.
- [121] Chen W J, Özdemir Ş K, Zhao G M, et al. Exceptional points enhance sensing in an optical microcavity [J]. Nature, 2017, 548(7666): 192-196.
- [122] Lai Y H, Suh M G, Li J, et al. A chip-based Brillouin laser gyroscope [C]//2020 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS), April 20-23, 2020, Portland, OR, USA. New York: IEEE Press, 2020.
- [123] Sunada S. Large Sagnac frequency splitting in a ring resonator operating at an exceptional point [J]. Physical Review A, 2017, 96(3): 033842.
- [124] 杨柳, 庄永勇, 刘阳, 等. 回音壁模式光学谐振腔研究进展 [J]. 大学物理, 2021, 40(5): 41-54.  
Yang L, Zhuang Y Y, Liu Y, et al. Progress of whispering gallery mode resonator [J]. College Physics, 2021, 40(5): 41-54.
- [125] 张翔宇, 康明, 刘会刚, 等. 非厄米光学系统中奇异点的传感应用 [J]. 中国激光, 2020, 47(3): 0300001.  
Zhang X Y, Kang M, Liu H G, et al. Sensing applications of exceptional points in non-Hermitian optical systems [J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(3): 0300001.

## Review on Stimulated Brillouin Scattering Effects and Their Applications in Integrated Optical Gyroscopes

Liu Chenchen, Gao Chengchun, Yang He<sup>\*</sup>, Xu Xiaobin, Song Ningfang

*School of Instrumentation and Optoelectronic Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China*

### Abstract

**Significance** Stimulated Brillouin scattering (SBS) is a typical third-order optical nonlinear effect describing the coupling between coherent light and phonon, which is the strongest nonlinear effect in the materials. Since the first realization in quartz and sapphire crystals in 1964, more work has been performed to study the SBS in various media, such as optical fibers, optical microcavities, gases and fluids. For the properties of narrow-linewidth and opposite-direction of the light generated by SBS, SBS lasers have many potential applications in the fields of laser, optical sensing, and optoelectronic devices related to fast and slow lights.

Optical gyroscope is an all solid-state angular velocity sensor based on the Sagnac effect with the advantages of high precision and high reliability. It has three main categories: ring laser gyroscope (RLG), fiber optical gyroscope (FOG) and micro optical gyroscope (MOG). RLG is sensitive to angular velocity by resonant laser beat frequency detection, which has the advantage of high stability of scale factor, but it has harsh requirements on the fabrication process. Interferometric fiber optical gyroscope (IFOG) owns the advantages of relatively simple structure and easy process, but the scale factor is not as stable as that of RLG. To improve the precision, hundreds or even thousands of kilometers of fiber are required to be accurately wound onto the ring-pillar. After decades of study, RLG and IFOG have been widely used in many optical sensor fields and navigation systems. In recent years, with the rapid development of autonomous driving, unmanned aerial vehicle and satellite platform, the demand for miniaturization and high precision of gyroscope is put forward, while the traditional gyroscope is difficult to meet these new requirements.

The sensing element of a resonant optical gyroscope is fiber ring or waveguide resonator. It only needs tens of meters of fiber or an on-chip microcavity with the diameter of millimeters to realize high-precision gyroscope, which is helpful for the miniaturization of the whole gyroscope devices theoretically. Based on the criterion that whether or not there is a laser source generated inside the fiber cavity, resonant optical gyroscope can be classified into active and passive ones, respectively. Subject to the disadvantages in linewidth, stability, various optical noise and complexity of the system, the passive fiber gyroscope is still under research in the laboratory, not completely used in real devices. On the other hand, with the continuous progress of nanophotonics and microfabrication technology, the active optical gyroscope based on SBS laser generation in the microcavity, combining both the advantages of laser gyroscope and traditional fiber optical gyroscope, provides a new way for the study of the miniaturized and integrated optical gyroscope. Theoretically, it could realize the excellent gyroscope with the advantages of easy integration, low threshold, high gain, large dynamic range and high sensitivity. However, the study on the micro-resonator Brillouin gyroscope has not reached such a high level yet. Therefore, it is meaningful to advance the study on the micro-resonator (such as microcavity, waveguide) Brillouin gyroscope for the development of integrated optical gyroscope and extend their applications in the real civil devices, weapons, and navigation systems.

**Progress** The basic parameters to characterize the stimulated Brillouin scattering effect mainly include the full width at half maximum (FWHM) of Brillouin gain spectrum, peak Brillouin gain and threshold. For solids and fluids, they are expressed by different equations, as shown in Eqs. (1)–(5). The Brillouin gain coefficient can be increased by doping and designing device structure. The corresponding Brillouin parameters in different types of fiber, microcavity, gas and liquid are summarized in Table 1 and, at the same time, their typical applications are introduced (Figs. 2–5). The research progress of miniaturized and integrated optical gyroscope based on SBS in the fiber and microcavity is thoroughly introduced (Fig. 6), including the study of exceptional point to achieve optical gyroscope with ultra-high sensitivity (Fig. 7).

**Conclusions and Prospects** Stimulated Brillouin scattering laser plays an important role in the field of miniaturization and integration of active resonating optical gyroscope. In this paper, the SBS effect and its corresponding applications in different media are detailedly summarized. Especially, the SBS effect is an important tool for the integration and miniaturization of optical gyroscope both in the fiber and micro-resonator systems. Hence, the studies on the SBS fiber optical gyroscope and micro-resonator gyroscope are reviewed to provide the recent progress of the integrated optical gyroscope. More interestingly, exceptional point excited in the optical microcavity has been found to own the possibility of significantly enhancing the sensitivity of the gyroscope, paving a new avenue for the study of a highly sensitive integrated optical gyroscope.

**Key words** scattering; stimulated Brillouin scattering; Brillouin laser; optical gyroscope; micro-cavity; exceptional point