

doi:10.19306/j.cnki.2095-8110.2018.06.001

## 光力惯性传感技术研究进展

熊威<sup>1</sup>, 尹璋琦<sup>2</sup>, 张晓宝<sup>1</sup>, 肖光宗<sup>1</sup>, 韩翔<sup>1</sup>, 罗晖<sup>1</sup>

(1. 国防科技大学前沿交叉学科学院, 长沙 410072;

2. 清华大学交叉信息研究院量子信息中心, 北京 100084)

**摘要:**光力惯性传感技术是利用光子与机械振子的相互作用,通过出射光的动量和角动量的变化实现对振子运动状态的监测,进而实现对其受力(矩),以及(角)速度、(角)加速度测量的新型惯性传感技术。该技术既有高极限精度的原理优势,又有微型化的技术优势,是惯性传感技术的前沿领域,具有极大的发展潜力。首先介绍了基于光阱系统和微腔系统的两类光力惯性技术,分析了其基本工作原理与物理特征;其次介绍了国内外光力惯性传感器件的研究现状;最后对光力惯性技术的发展特点、国内外差距进行了总结,并给出了我国发展光力惯性传感技术的建议。

**关键词:**惯性传感;光力学;光阱技术;光学微腔

中图分类号:U666.1

文献标志码:A

文章编号:2095-8110(2018)06-0001-08

## Advance of Optomechanical Inertial Sensing Technology

XIONG Wei<sup>1</sup>, YIN Zhang-qi<sup>2</sup>, ZHANG Xiao-bao<sup>1</sup>, XIAO Guang-zong<sup>1</sup>, HAN Xiang<sup>1</sup>, LUO Hui<sup>1</sup>

(1. College of Advanced Interdisciplinary Studies, National University of Defense Technology, Changsha 410072, China; 2. Center for Quantum Information, Institute for Interdisciplinary Information Sciences, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** In an optomechanical system, photons and the mechanical oscillators act on each other, and the motion of the oscillators can be monitored by the change of momentum or energy of the light. The optomechanical inertial sensing technology uses this principle to realize the measurement of the force/torque, the linear/angular velocity and the linear/angular acceleration. Combining the advantages of high limit accuracy and miniaturization, this technology is one of the frontiers in the field of inertial sensing technology with extreme development potential. First the basic principles and characteristics of the optomechanical inertial sensing technology based on optical trapping system and microcavity system are introduced, followed by their research status. Afterwards the development characteristic of this technology and the gap between domestic and overseas organizations are summarized. Some suggestions about the domestic development of inertial sensing technology are made in the end.

**Key words:** Inertial sensing; Optomechanics; Optical trapping; Optical microcavity

收稿日期:2018-08-05;修订日期:2018-09-06

基金项目:湖南省自然科学基金(2017JJ3363)

作者简介:熊威(1990-),男,博士研究生,主要从事光阱技术方面的研究。E-mail: dolarx@sina.com

通信作者:肖光宗(1983-),男,博士,讲师,主要从事光电惯性技术方面的研究。E-mail: xiaoguangzong@nudt.edu.cn

## 0 引言

自20世纪30年代德国第一次在火箭中使用惯性器件以来,惯性导航技术经历了几十年的发展,已经成为航海、航空、航天领域中的核心技术。惯性导航系统包含陀螺仪与加速度计两大关键部件,其中陀螺仪为运载体提供各种姿态参数,加速度计测量运载体的加速度,从而推算出运载体的运动轨道。随着反卫星技术的发展,不依赖于卫星的新机理定位导航技术已经成为各军事强国努力发展的重点方向。美国国防部高级研究计划局(Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA)于2011年启动了用于定位、导航和授时的微技术(Microtechnology for Positioning, Navigation, and Timing, Micro-PNT)项目,旨在研制一种尺寸小、质量小和功耗低的自主式芯片级惯性导航和精确制导系统作为全球定位系统(Global Positioning System, GPS)的备份。微惯性器件是 Micro-PNT 的核心,传统的基于微机电系统(Micro-Electro-Mechanical System, MEMS)技术的微惯性器件远不能满足其性能要求。因此,世界上各发达国家正积极探索具备微型化兼顾高精度潜力的惯性器件新原理、新方法和新技术<sup>[1-2]</sup>。

近年来,随着量子光学、微腔光子学和微光机电技术的快速发展,光力学与惯性技术的结合催生了光力惯性传感技术,为下一代惯性技术的发展提供了新的思路。光力惯性传感技术主要利用光子与机械振子耦合引起的光动量和角动量的变化,对系统加速度、角速度进行测量,具有极高的品质因子,且振子有望制备到量子态,可进一步提高测量极限灵敏度。目前光力惯性传感技术的物理系统主要包括光阱系统和微腔系统。本文主要分析了光力惯性传感技术的基本原理和性能特征,分别介绍了它们的发展概况,总结了它们的发展趋势。

### 1 基于光阱系统的光力惯性传感技术

对称的梯度光场与微粒相互作用时,形成一种能束缚微粒的势阱,称为光阱<sup>[3]</sup>。根据光阱的不同光路结构,可以将光阱分为单光束光阱、双光束光阱、多光束光阱等。单光束光阱利用强聚焦的激光束实现对微粒的三维束缚,如图1(a)所示;双光束光阱利用两束激光相向传播,对微粒进行夹持以实现捕获,如图1(b)所示;多光束光阱一般通过全息

光镊技术和分时扫描光镊技术,实现对多个微粒的同时捕获。

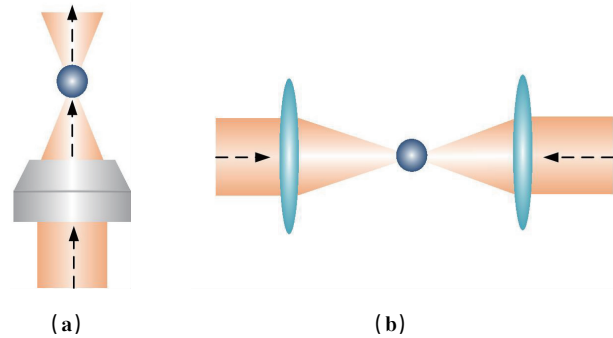


图1 (a)单光束光阱;(b)双光束光阱

Fig. 1 (a) Single-beam optical trap; (b) Dual-beam optical trap

#### 1.1 基本原理

2005年麻省理工学院提出了采用双光束光阱系统实现加速度测量的方案<sup>[4]</sup>,其基本结构如图2所示。两束相向传播的高斯光束形成双光束光阱,其轴向(光束传播方向)和横向(光束横截面方向)光力分布如图3(a)和图3(b)所示,可见在横向上光阱系统对微纳介质实现捕获与束缚,在轴向上一定的范围内光力正比于微纳介质偏离平衡位置的位移。以轴向作为敏感轴方向,则当有轴向加速度输入时,传感质量受力满足  $F = ma = kx$ 。其中,  $m$  为质量,  $a$  为载体加速度,  $k$  为光阱刚度,  $x$  为传感质量相对于光阱中心的位移。可见,位移  $x$  与载体的惯性加速度  $a$  成正比,可实现对惯性加速度的测量。

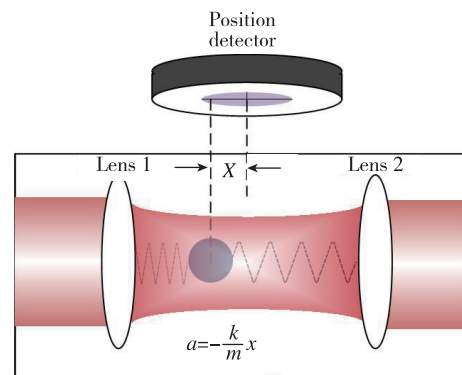


图2 双光束光阱加速度测量原理图

Fig. 2 Schematic of acceleration sensing in dual-beam optical trap

光阱系统中利用光子的动量或角动量实现微

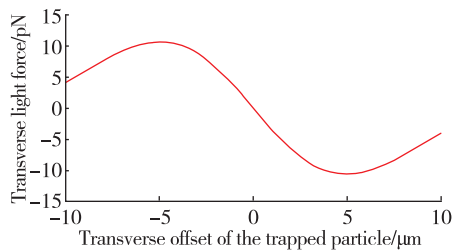


图 3(a) 横向光力随微球横向偏移的变化曲线

Fig. 3(a) Curve of the transverse light force with transverse offset of the particle

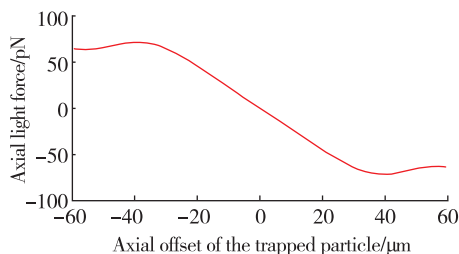


图 3(b) 轴向光力随微球轴向偏移的变化曲线

Fig. 3(b) Curve of the axial light force with axial offset of the particle

纳尺度转子的高速旋转,在高转速条件下,转子具有定轴性,其角速度矢量  $\omega$  的方向在惯性空间中保持不变,如图 4 所示。当载体相对于惯性空间有转角  $\Delta\theta$  时,可以通过读取  $\omega$  相对于载体的转角信号来实现载体角速度的测量<sup>[5]</sup>。

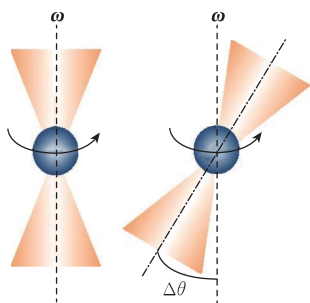


图 4 光力陀螺示意图

Fig. 4 Schematic of the optomechanic gyroscope

## 1.2 原理优势

### 1) 悬浮微纳介质

惯性器件中采用较多的机械支承会带来不可避免的机械摩擦,其中挠性支承还会存在由于支承材料应力的持续释放而引入的误差;而悬浮式支承由于无机械接触,彻底消除了机械式支承带来的测量误差,成为实现高精度惯性传感的重要技术途径。

传统惯性器件中的悬浮技术主要包括静电悬浮和磁悬浮两种。磁悬浮惯性器件中,涡流生热使器件的功耗较高,难以满足微系统集成的要求。因此,磁悬浮惯性器件难以实现微型化。静电悬浮惯性器件采用电荷之间的静电力实现球转子悬浮,具有很高的力/力矩分辨率,球转子静电陀螺仪是目前世界上精度最高的一种陀螺仪,也是目前各国海军舰艇长航时条件下纯自主导航系统的标准配置。但精密微转子加工、高精度悬浮间隙控制等因素,导致其工艺复杂、难度大、造价昂贵<sup>[6]</sup>。同时,由于静电力微弱闭环控制需要高的极间电压,容易导致电极击穿,这就限制了静电悬浮惯性器件的量程和动态性能<sup>[7]</sup>。

光阱系统采用光阱实现对微纳介质(微球)的悬浮,结构简单,无需精密加工和装配技术,为光力惯性传感技术走向实用奠定了基础。

### 2) 极高的力学分辨率

根据量子理论,光子动量大小可表示为

$$P_{\text{photon}} = \frac{h}{\lambda} \quad (1)$$

其中,  $h$  为普朗克常数,  $\lambda$  为光波长。因此光子与物质相互作用过程中传递的动量大小为  $P_{\text{photon}}$ , 设光子与质量为  $1.4\text{ng}$  的石英微球作用,光波长为  $980\text{nm}$ , 则单位时间光子动量反冲作用在微粒上的力为

$$F = \frac{P_{\text{photon}}}{\Delta t} = 6.8 \times 10^{-28} \text{ N} \quad (2)$$

可见,光与物质的相互作用力具有非常高的分辨率极限。2015年,内华达大学的 Ranjit 等在真空中搭建了一组双光束光阱系统,实现了  $10^{-18} \text{ N}$  量级的微力测量<sup>[8]</sup>。2016年,该课题组又使用光学晶格捕获激光冷却的二氧化硅纳米球,实现了灰牛级的力学测量分辨率<sup>[9]</sup>。

光阱系统也具有极高的力矩测量能力。2016年,李统藏课题组的 T. M. Hoang 等利用线偏光悬浮非均匀的纳米钻石颗粒,测量了其扭矩变化。并提出了该结构可作为一种微型扭秤,其力矩测量灵敏度可以达到  $10^{-29} (\text{N} \cdot \text{m}) / \sqrt{\text{Hz}}$ <sup>[10]</sup>。

### 3) 微纳介质的等效冷却

常温条件下,光阱系统中被捕获微纳介质的布朗运动是其位置噪声的主要来源。为提高光阱系统中微纳介质位置信号的信噪比,已有多个研究小组实现了对微纳介质的等效冷却。

2011年,美国德克萨斯州立大学奥斯汀分校的

M. G. Raizen 研究团队在成功测量真空中光悬浮微球的瞬时速率的基础上,用3条外加冷却光束对微球的运动进行实时反馈式调节,将双光束光阱中  $\text{SiO}_2$  微球的质心运动从室温冷却至  $1.5\text{mK}^{[11-12]}$ 。2013年,英国圣安德鲁斯大学的 K. Dholakia 研究团队实现了微球的无反馈冷却,利用圆偏振光与真空中晶体微球作用产生高速旋转,微球自身的陀螺效应提升了微球的稳定性,质心运动的温度降低至  $40\text{K}^{[13]}$ 。2014年,西班牙巴塞罗那光子科学研究所(ICFO)的 J. Gieseler 等研究团队成功实现了参数反馈对单光束光阱中纳米微球的三维冷却,并将这种冷却用于可移动光纤光阱中微球的冷却<sup>[14]</sup>。2015年,苏黎世联邦理工学院的 V. Jain 等利用激光悬浮的纳米粒子测量光子反冲加热,利用反馈冷却将纳米粒子的质心温度降低至  $450\mu\text{K}^{[15]}$ 。

### 1.3 发展现状

2008年,麻省理工学院设计了一种利用光镊探测加速度的装置,其原理如图5所示。激光器中的激光分别通过偏振控制器与快速可变衰减器后被分为两束,一束作为测量光束,另外一束光分别经过扩束装置与聚焦透镜聚焦于真空腔中。位于真空腔底部的微粒被发射装置弹向空中,被汇聚的激光捕获。被微粒散射的激光通过透镜聚焦到一个光电探测器上,通过探测器测量微粒沿光束轴向上的位移。该系统能感应到沿光束轴向上的  $1g$  大小的恒定重力加速度,通过可变衰减器和控制电路实现对微粒位置的闭环控制,初步试验实现了  $119\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$  的加速度测量灵敏度<sup>[16]</sup>。

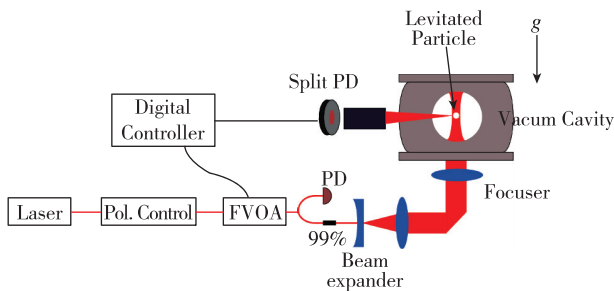


图5 单光镊光力加速度探测结构图<sup>[16]</sup>

Fig. 5 Diagram of the experimental apparatus used to demonstrate the feasibility of a LFA (Light Force Accelerometer)

2010年,该小组又利用双光束光阱建立了一套加速度测量装置。该系统去掉了空间光扩束结构,将光纤中出射激光直接聚焦于真空腔中。并且增

加了一路捕获光,形成双光束悬浮,一定程度上提高了加速度计的分辨率与零偏稳定性等性能<sup>[17]</sup>。

2018年,耶鲁大学 Monteiro 等设计了一种基于单光束光镊的加速度测量装置,如图6所示。微粒被捕获于真空腔中,使用声光调制器与压电转镜对系统进行反馈控制。他们研究了质量为  $0.1\sim 30\text{ng}$  的微球对于加速度的响应,发现适当增加微球质量,有利于提高测量分辨率。他们使用  $12\text{ng}$  的微球实现了  $0.4\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$  的测量灵敏度,并且经过长时间统计的平均测量精度可以达到  $\text{ng}$  量级<sup>[18]</sup>。

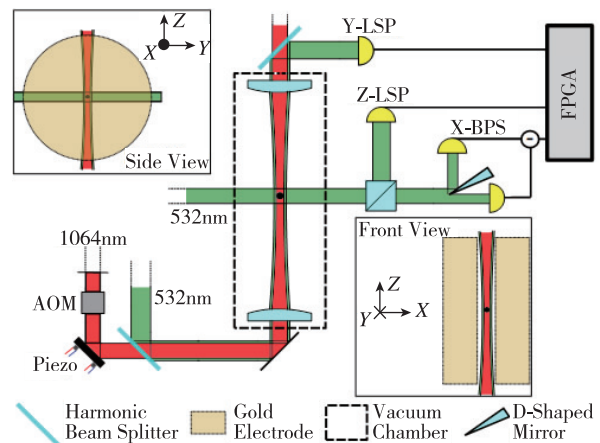


图6 光阱加速度传感实验装置示意图<sup>[18]</sup>

Fig. 6 Schematic of the optical trap acceleration sensing experimental setup

2018年,加州大学的 Alexander 等使用单光束外差探测结构对直径  $5\mu\text{m}$  的微球进行测量,加速度灵敏度达到  $7.7\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}^{[19]}$ 。2018年,苏黎世联邦理工学院的 E. Hebestreit 也提出了一种测量重力的光阱系统<sup>[20]</sup>。

光阱系统也可用于测量角速度。2013年,圣安德鲁斯大学的 Y. Arita 等在真空腔中利用圆偏振光捕获球霰石微粒,利用球霰石晶体的双折射特性实现了对捕获微粒的旋转。图7所示为在不同气压下微粒的旋转速度:在大气压下转速为  $110\text{Hz}$ ,当气压降低至  $0.1\text{Pa}$  后转速达到了  $5\text{MHz}^{[21]}$ 。转速增加后,微粒的转轴指向更加稳定,出现了明显的陀螺效应。他们指出这种效应可用于测量载体的角速度。

2018年,李统藏课题组利用光镊捕获了一种哑铃状的二氧化硅微粒,在真空环境下利用圆偏光旋转二氧化硅哑铃,转速超过了  $1\text{GHz}$ 。这是目前为止人造物体达到的最快转速<sup>[22]</sup>。

在国内,浙江大学设计了基于光纤光阱的光力加

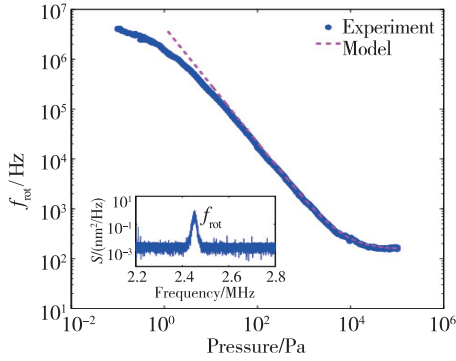
图 7 不同气压下捕获微粒的转速<sup>[21]</sup>

Fig. 7 Rotation rate of a trapped particle at different gas pressures

速度计,并开展了相关基础理论和实验研究<sup>[23-24]</sup>。北京航空航天大学利用射线模型分析了光力加速度计的理论精度<sup>[25]</sup>。国防科技大学近年来一直致力于发展光力惯性传感技术,在双光束失准机理<sup>[26-28]</sup>、微球位置探测<sup>[29]</sup>、片上光阱系统等光力加速度计的基础理论和关键技术研究方面均取得了较大进展,同时他们还使用旋转多普勒效应成功测量了球霰石微粒的转速,初步验证了光力陀螺的理论可行性<sup>[30]</sup>。

## 2 基于微腔系统的光力惯性传感技术

典型的微腔光力学系统包含一个光学谐振腔和一个阈值耦合的机械振子(力学元件)。机械振子在光压的作用下做受迫振动,其力学运动状态通过光压与光学腔的性质联系起来<sup>[31]</sup>。这种形式,犹如经典理论中的弹簧振子,可展现出丰富的光力学效应,可应用于惯性传感技术。

### 2.1 基本原理

图 8 所示为一个 Fabry-Perot 腔(F-P 腔)构成的腔光机械系统。F-P 腔包含一个固定的腔镜和一个可移动的腔镜。可移动的腔镜等效为经典力学中的弹簧谐振子。当系统中存在水平加速度时,等效于施加在腔镜上的弱力。腔镜在它的驱动下移动而改变腔长,从而导致输出光场的相位移动和强度改变。通过测量相关的光学参数,就可以实现对加速度的传感。

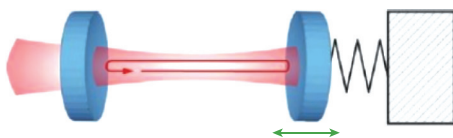


图 8 F-P 腔构成的腔光机械系统

Fig. 8 Fabry-Perot cavity optomechanical system

与一般谐振子模型不同的是,由于悬挂的腔镜也会受到腔内光场的辐射压力,当腔镜发生位移时,其内部的光场也会发生相应的变化,即驱动力是关于腔镜位移的函数。这个现象会导致光学弹簧效应和光学阻尼的产生,从而导致系统存在多个稳态<sup>[32]</sup>,甚至产生混沌现象<sup>[33]</sup>。

微腔系统还可以用于角速度的测量。2017 年,英国国家物理研究所的 J. Silver 设计了利用非线性克尔效应增强的微腔陀螺<sup>[34]</sup>,其原理如图 9 所示。激光从 2 个方向泵浦圆柱形微腔,使该微腔构成的光学环路中同时运转顺时针(Clock Wise, CW)、逆时针(Counter-Clock Wise, CCW)两路光。载体旋转时,这两路光产生 Sagnac 效应,光频差正比于载体的角速度。

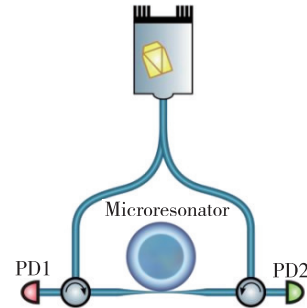
图 9 微腔陀螺简图<sup>[34]</sup>

Fig. 9 Simplified microresonator gyro setup.

### 2.2 原理优势

#### 1) 高分辨率

在腔光机械系统中,机械装置和腔内电磁场相耦合,这种耦合可增强机械运动的读数精度。在微腔系统中,理论上测量的腔镜位移精度可以达到甚至小于标准量子极限,最高精度受限于机械装置基态的量子涨落<sup>[35]</sup>。

#### 2) 腔光力冷却

微腔系统中主要存在光场散粒噪声、辐射压噪声和热噪声。通常情况下,热噪声要远大于其他两者。所以,对腔镜的冷却是降低系统噪声的重要方法之一。

目前,微腔系统中,对于机械振子的冷却主要有两种方法。一种为反馈冷却,是由 S. Mancini 等于 1998 年提出<sup>[36]</sup>,并在 1 年后由法国的 P. F. Cohadon 等实现<sup>[37]</sup>。其核心思想是利用相位敏感探测方法,从腔的输出场中获取振子位移的信息,然后改变输入光场,从而通过辐射压力的变化来抵消热噪声所产生的随机力。反馈冷却的效果

受到位置读取精度以及探测器噪声和振子驱动噪声间关联的限制,很难实现量子基态的冷却<sup>[38]</sup>。另一种则是仿效激光冷却离子中所使用的边带冷却原理。系统的冷却过程可以用拉曼散射过程解释。当驱动激光的频率位于腔场共振频率的红边带时,声子会在激光的辅助下转换为腔模中的光子。这样,振动的能量就不断转移到了光场中泄漏出去,从而实现了机械振子的冷却<sup>[39-40]</sup>。2011年,加州理工大学的 J. Chan 等,在微腔系统中利用边带冷却成功将一个硅微梁冷却到了它的量子基态,实验中得到的声子占有数为  $\bar{n}=0.85\pm 0.04$ <sup>[41]</sup>。

理论上,基于微腔系统的光力惯性传感技术比基于光阱系统的光力惯性传感技术具有更高的灵敏度潜力,但微腔系统对微腔制备等微纳加工工艺要求较高,工程实现难度较大。

### 2.3 发展现状

微腔系统在惯性传感技术方面的应用主要在加速度测量。2012年,加州理工大学的 A. G. Krause 等,利用光子晶体拉锁型微腔制作了一个可集成于微芯片上的超高带宽、灵敏度的加速度计<sup>[42-43]</sup>,其结构及工作原理如图 10 所示。

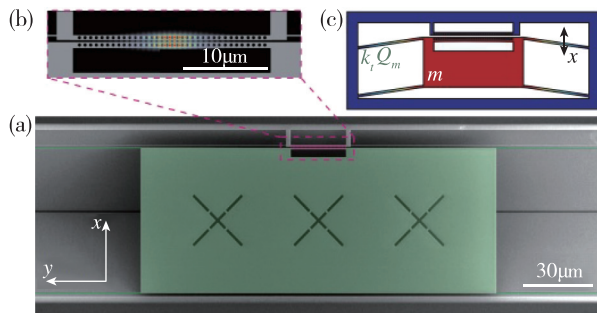


图 10 微腔加速度计设计图<sup>[42]</sup>

Fig. 10 Overview of the cavity optomechanical accelerometer design

图 10(a)所示为加速度计的总图,图片是由扫描电子显微镜(Scanning Electron Microscope, SEM)拍摄得到的。中间的绿色方块为测量加速度所用的质量块,其 4 个角处均有氮化硅制作的弹性微绳连接。图 10(b)是(a)的局部放大,可以看到,光腔是由 2 个一维光子晶体像拉锁一样排列而成。上部的一束光子晶体被固定,下部的一束被安装在质量块上,可跟随质量块上下运动。图 10(c)所示为展示加速度计工作时的状态。当垂直方向具有加速度时,质量块也会上下移动,从而导致两束一

维光子晶体之间的距离发生改变,使得拉锁腔内的光学谐振模式发生变化。激光通过在腔下方与光子晶体束平行的耦合光纤锥注入到腔中,同时腔中的谐振模式也会通过耦合光纤锥输出,从而测量出加速度。经过实验测定,加速度计的工作带宽高达 20kHz,测量灵敏度达到了  $10\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。

2013年,美国国家标准技术研究所、马里兰大学的 F. G. Cervantes 等研究人员使用光纤加工出了一种微型的 F-P 腔,并将其使用在了加速度传感上<sup>[44-45]</sup>。当物体受到水平方向的加速度,导致腔长发生变化时,通过探测分析光纤中输出光的频谱,就可以得出物体当前的加速度。理论上灵敏度最高可以达到  $1.5\text{ng}/\sqrt{\text{Hz}}$ ,经过实验测量,其灵敏度达到了  $0.4\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$ ,测量带宽达到了几 kHz。O. Gerberding 等提出了与上述方案类似的由光纤组成的微腔光力加速度计,它的量程范围覆盖 2mg~2g 之间,灵敏度的不确定度为  $5\times 10^{-4}$ <sup>[46]</sup>。

微腔同样可以用于测量角速度。2015年,美国加州理工大学的 K. Vahala 研究组,使用集成于芯片上的高 Q 值硅基微腔制作了一种微腔布里渊陀螺<sup>[47]</sup>。其中,布里渊激光通过泵浦 18mm 直径, Q 值为  $1.205\times 10^8$  的微腔产生。使用了一个频率-电压转换器读出陀螺信号,其输出电压与布里渊拍频变化成正比。通过实验测量,该微腔布里渊陀螺的灵敏度达到了  $15[(^\circ)/\text{h}]/\sqrt{\text{Hz}}$ 。

2016年,美国 OEwaves 公司的 W. Liang 等使用 CaF 材料的回音壁微腔制作了一种光学陀螺<sup>[48]</sup>,该陀螺的随机游走系数为  $0.03(^\circ)/\sqrt{\text{h}}$ ,频移为  $2(^\circ)/\text{h}$ 。

微腔中的非线性效应有助于提升陀螺精度。2014年,美国史蒂文斯理工学院的 C. Wang 与 C. P. Search 从理论上证明了非线性克尔折射率在非旋转状态下会导致正逆时针传播模式的强度分岔,这种效应可与微腔陀螺中的 Sagnac 效应相结合,提高系统性能,可将微腔陀螺对角速度的敏感性提升 4 个数量级。考虑到探测器噪声,半径为 1.4mm 的微腔可以达到  $1(^\circ)/\text{h}$  的传感极限<sup>[49]</sup>。2017年,英国国家物理研究所的 J. Silver 等在实验上演示了非线性克尔增强的微腔陀螺,灵敏度达到了几度每秒<sup>[34]</sup>。

在国内,中北大学 2006 年开始高 Q 微腔的制作工艺研究,并于 2011 年对基于平面微盘腔的新型光学陀螺进行了实验探索:将微盘腔与另一个 F-P 腔的谐振效应进行对照实验,测试了微腔陀螺的基

本性能参数<sup>[50]</sup>。国防科技大学采用四条二氧化硅的微结构绳,将一个二氧化硅材质的检测质量块悬吊起来,并于微盘腔形成进场耦合,理论上加速度分辨率达到0.5ng。

### 3 总结

光力惯性传感技术建立在量子光学、微腔光子学和微光机电技术快速发展的基础之上,既有高精度原理优势,又有微型化的技术优势,是惯性传感技术的前沿领域,具有极大的发展潜力。光力惯性传感技术起步晚,相关基础理论和工艺还不够完善,大多处于理论方案探索和关键技术攻关阶段。目前,基于光阱系统和微腔系统的光力惯性传感技术的发展主要有以下特点:

基于光阱系统的加速度测量可按照超高精度、大系统和微型化、高精度2个方向发展。前者可用于空间加速度测量、微重力探测等领域,后者可用于长航时导航领域。发展重点在于微纳介质等效冷却技术、微纳介质的位移高精度探测技术。基于光阱系统的角速度测量仍处于原理验证阶段。基于微腔系统的加速度测量方案较多,但仍需探索能够兼顾高分辨率、高稳定性的方案。基于微腔系统的角速度测量刚刚起步,仍处于原理验证阶段。

总体上,我国在光力惯性传感技术方面起步较晚,研究机构较少,且大多从事基础理论研究,与国外在实验研究方面差距较大。建议加强不同优势单位的联合协作,更加重视基础工艺和关键技术的研究。

### 参考文献

- [1] 江城,张嵘. 美国 Micro-PNT 发展综述[C]// 中国卫星导航学术年会, 2015.
- [2] 刘飞,郭中洋. 面向 Micro-PNT 系统的微陀螺敏感结构参数化有限元仿真研究[J]. 导航定位与授时, 2018,5(3): 87-92.
- [3] 李银妹. 光镊技术[M]. 北京: 科学出版社, 2016.
- [4] Kelleher W P, Smith S P, Stoner R E. Optically rebalanced accelerometer: US, US6867411[P]. 2005.
- [5] 祁子浚. 新型转子式微陀螺球碟转子结构设计[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014: 14-15.
- [6] 任博译. 导航与定向设备中的超声无触点支承[J]. 导航与控制, 2003,2(2).
- [7] 祁子浚. 新型转子式微陀螺球碟转子结构设计[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
- [8] Ranjit G, Atherton D P, Stutz J H, et al. Attonewton force detection using microspheres in a dual-beam optical trap in high vacuum[J]. *Physical Review A*, 2015, 91(5): 051805.
- [9] Ranjit G, Cunningham M, Casey K, et al. Zeptonewton force sensing with nanospheres in an optical lattice[J]. *Physical Review A*, 2016, 93(5).
- [10] Hoang T M, Ma Y, Ahn J, et al. Torsional optomechanics of a levitated nonspherical nanoparticle[J]. *Physical Review Letters*, 2016, 117(12).
- [11] Li T, Kheifets S, Medellin D, et al. Measurement of the instantaneous velocity of a Brownian particle. [J]. *Science*, 2010, 328(5986):1673-1675.
- [12] Li T. Fundamental tests of physics with optically trapped microspheres[M]. Springer, 2013.
- [13] Yoshihiko A, Michael M, Kishan D. Laser-induced rotation and cooling of a trapped microgyroscope in vacuum [J]. *Nature Communications*, 2013, 4(4):2374.
- [14] Gieseler J, Deutsch B M, Quidant R, et al. Sub-Kelvin parametric feedback cooling of a laser-trapped nanoparticle[J]. *Physical Review Letters*, 2012, 109(10):103603.
- [15] Jain V, Gieseler J, Moritz C, et al. Direct measurement of photon recoil from a levitated nanoparticle [J]. *Physical Review Letters*, 2016, 116(24):243601.
- [16] Butts L G. Development of a light force accelerometer [D]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 2008.
- [17] Kotru K. Toward a demonstration of a light force accelerometer[D]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 2010.
- [18] Monteiro F, Ghosh S, Fine A G, et al. Optical levitation of 10 nanogram spheres with nano-g acceleration sensitivity [J]. *Physical Review A*, 2017(96): 063841.
- [19] Rider A D, Blakemore C P, Gratta G, et al. Single-beam dielectric-microsphere trapping with optical heterodyne detection[J]. *Physical Review A*, 2018, 97(1): 013842.
- [20] Hebestreit E, Frimmer M, Reimann, et al. Measuring gravity with optically levitated nanoparticles [C]// OSA Technical Digest (online) (Optical Society of America, 2018), NoTu4J. 2.
- [21] Yoshihiko A, Michael M, Kishan D. Laser-induced rotation and cooling of a trapped microgyroscope in vacuum [J]. *Nature Communications*, 2013, 4(4):2374.
- [22] Ahn J, Xu Z, Bang J, et al. Optically levitated nanodumbbell torsion balance and GHz nanomechanical rotor [J]. *Physical Review Letters*, 2018, 121(3).

- [23] 刘承, 白剑, 胡慧珠, 等. 利用双光束光纤光阱测量加速度的装置: CN, CN 100580456 C[P]. 2010.
- [24] 刘承, 白剑, 胡慧珠, 等. 利用双光束光纤光阱测量加速度的装置: CN, CN 100580456 C[P]. 2010.
- [25] Feng L S, Jiao H C, Yao B Y. Sensitivity analysis of light force accelerometer based on optical trapping Mie microsphere[J]. *Optoelectronics Letters*, 2014, 10(1): 77-80.
- [26] Chen X, Xiao G, Yang K, et al. Characteristics of the orbital rotation in dual-beam fiber-optic trap with transverse offset[J]. *Optics Express*, 2016, 24(15): 16952-16960.
- [27] Xiao G, Yang K, Luo H, et al. Orbital Rotation of trapped particle in a transversely misaligned dual-fiber optical trap[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2016, 8(1): 1-8.
- [28] Chen X, Xiao G, Yang K, et al. Characteristics of the orbital rotation in dual-beam fiber-optic trap with transverse offset[J]. *Optics Express*, 2016, 24(15): 16952-16960.
- [29] Xiong W, Xiao G, Han X, et al. Back-focal-plane displacement detection using side-scattered light in dual-beam fiber-optic traps [J]. *Optics Express*, 2017, 25(8):9449-9457.
- [30] Chen X. Rotation of an optically trapped vaterite microsphere measured using rotational Doppler effect [J]. *Optical Engineering*, 2018, 57(3):1.
- [31] 张旸. 基于腔量子电动力学系统及腔光力系统的光子操控[D]. 大连: 大连理工大学, 2017.
- [32] Marquardt F, Harris J G, Girvin S M. Dynamical multistability induced by radiation pressure in high-finesse micromechanical optical cavities[J]. *Physical Review Letters*, 2006, 96(10):103901.
- [33] Carmon T, Cross M C, Vahala K J. Chaotic quivering of micron-scaled on-chip resonators excited by centrifugal optical pressure[J]. *Physical Review Letters*, 2007, 98(16):167203.
- [34] Silver J, Bino L D, Del'Haye P. A nonlinear enhanced microresonator gyroscope[C]// *Lasers and Electro-Optics Europe & European Quantum Electronics Conference*. IEEE, 2017: 1.
- [35] Anetsberger G, Verlot P, Gavartin E, et al. Measuring nanomechanical motion with an imprecision below that at the standard quantum limit[C]// *CLEO: 2011-Laser Science to Photonic Applications*. IEEE, 2011:1-2.
- [36] Mancini S, Vitali D, Tombesi P. Optomechanical cooling of a macroscopic oscillator by homodyne feedback[J]. *Physical Review Letters*, 1998, 80(4): 688-691.
- [37] Cohadon P F, Heidmann A, Pinard M. Cooling of a mirror by radiation pressure [J]. *Physical Review Letters*, 2004, 83(16):3174-3177.
- [38] Genes C, Vitali D, Tombesi P, et al. Erratum: Ground-state cooling of a micromechanical oscillator; Comparing cold damping and cavity-assisted cooling schemes[J]. *Physical Review A*, 2009, 77(3):156.
- [39] Marquardt F, Chen J P, Clerk A A, et al. Quantum theory of cavity-assisted sideband cooling of mechanical motion[J]. *Physical Review Letters*, 2007, 99(9):093902.
- [40] Schliesser A, Anetsberger G, Arcizet O, et al. Resolved-sideband cooling of a micromechanical oscillator[J]. *Nature Physics*, 2007, 4(5):1-2.
- [41] Chan J, Alegre T P, Safavi-Naeini A H, et al. Laser cooling of a nanomechanical oscillator into its quantum ground state. [J]. *Nature*, 2011, 478(7367): 89-92.
- [42] Blasius T, Krause A, Painter O J. Chip-scale cavity-optomechanical accelerometer[M]. 2013.
- [43] Krause A G, Winger M, Blasius T D, et al. A high-resolution microchip optomechanical accelerometer [J]. *Nature Photonics*, 2012, 6(11):768-772.
- [44] Cervantes F G, Kumanchik L, Pratt J, et al. Self-calibrating ultra-low noise, wide-bandwidth optomechanical accelerometer[J]. 2013.
- [45] Cervantes F G, Kumanchik L, Pratt J, et al. Self-calibrating optomechanical accelerometer with high sensitivity over 10 kHz[J]. *Applied Physics Letters*, 2013(104).
- [46] Gerberding O, Cervantes F G, Melcher J, et al. Optomechanical reference accelerometer[J]. *Metrologia*, 2015, 52(5).
- [47] Li J, Suh M G, Vahala K. Microresonator Brillouin Gyroscope[C]// *Nonlinear Optics*, 2015:NTh3A.2.
- [48] Liang W, Ilchenko V, Eliyahu D, et al. Whispering gallery mode optical gyroscope[C]// *IEEE International Symposium on Inertial Sensors and Systems*. IEEE, 2016:89-92.
- [49] Wang C, Search C P. Enhanced rotation sensing by nonlinear interactions in silicon microresonators[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(15):4376-4379.
- [50] Liu J, Wang X, Zhao M, et al. The research of a novel gyroscope based on high Q micro-resonator[C]// *IEEE International Conference on Nano/micro Engineered and Molecular Systems*. IEEE, 2011:1132-1135.