



悬浮光力传感技术研究进展 (特邀)

张皓铭 熊威 韩翔 陈鑫麟 邝腾芳 彭妙 袁杰 谭中奇 肖光宗 罗晖

Research progress in levitated optomechanical sensing technology (*invited*)

Zhang Haoming, Xiong Wei, Han Xiang, Chen Xinlin, Kuang Tengfang, Peng Miao, Yuan Jie, Tan Zhongqi, Xiao Guangzong, Luo Hui

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.3788/IRLA20230193>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

用于精密测量的低噪声激光器研究进展 (特邀)

Recent development of low noise laser for precision measurement (*Invited*)

红外与激光工程. 2020, 49(12): 20201073 <https://doi.org/10.3788/IRLA20201073>

光阱中微粒位置高精度检测技术

High precision detection technology of particle positions in optical trap

红外与激光工程. 2019, 48(12): 1213001 <https://doi.org/10.3788/IRLA201948.1213001>

集成微腔光频梳在精密测量中的应用 (特邀)

Applications of integrated microresonator-based optical frequency combs in precision measurement (*Invited*)

红外与激光工程. 2021, 50(11): 20210560 <https://doi.org/10.3788/IRLA20210560>

海洋激光遥感技术研究进展(特邀)

Research progress of ocean laser remote sensing technology(*invited*)

红外与激光工程. 2018, 47(9): 903003 <https://doi.org/10.3788/IRLA201847.0903003>

基于光纤自适应操控的激光相控阵技术研究进展(特邀)

Research progress of laser phased array technique based on fiber adaptive manipulation(*Invited*)

红外与激光工程. 2018, 47(1): 103003 <https://doi.org/10.3788/IRLA201847.0103003>

高增益红外单光子探测技术研究进展 (特邀)

Research progress of infrared single-photon detection with high gain (*Invited*)

红外与激光工程. 2021, 50(1): 20211016 <https://doi.org/10.3788/IRLA20211016>

悬浮光力传感技术研究进展 (特邀)

张皓铭^{1,2}, 熊 威^{1,2}, 韩 翔^{1,2}, 陈鑫麟^{1,2}, 邝腾芳^{1,2}, 彭 妙^{1,2}, 袁 杰^{1,2},
谭中奇^{1,2}, 肖光宗^{1,2*}, 罗 晖^{1,2}

(1. 国防科技大学 前沿交叉学科学院, 湖南 长沙 410073;
2. 国防科技大学 南湖之光实验室, 湖南 长沙 410073)

摘要: 悬浮光力传感技术利用真空环境的光阱实现对微纳尺度机械振子的悬浮和囚禁, 将待测物理量转换为光悬浮机械振子运动参数的变化, 理论上该振子与外部环境热噪声和振动完全隔绝, 具有极高的测量分辨率潜力和易于小型化的独特优势。该技术在精密测量、微观热力学研究、暗物质观测、宏观量子态操控等领域具有广阔的应用前景。首先, 阐述了悬浮光力系统中光力与光阱的基础概念和力学测量等基本理论; 其次, 介绍了其中初始起支、光力增强、位移测量、输出信号标定和等效反馈冷却等关键技术的研究进展, 对比分析各子技术的特点, 随后列举了悬浮光力传感技术在极弱力、加速度、微观质量、电学量、力矩等物理量测量中的典型应用; 最后, 总结了该技术的发展趋势, 并提出相关建议。

关键词: 悬浮光力学; 量子传感; 光阱; 精密测量

中图分类号: TH823 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20230193

0 引言

作为量子科技的一大研究赛道, 量子传感技术通过电子、光子、声子等微观量子体系与外界环境的相互作用, 精确感知强度极弱的物理量, 测量精度就此实现质的飞跃^[1-2]。自 2019 年开始, 代表精密测量最高水平的七大基本物理量的计量基准全部实现量子化^[3], 这标志着精密测量已经进入量子时代。

随着激光器的发明, 光的力学效应及应用进入了快速发展阶段。1970 年, 美国贝尔实验室 Ashkin^[4-5]首次观察到被激光照射后微米尺度乳胶小球的加速运动和稳定悬浮等现象, 由此从实验证实了显著的光辐射压作用, 并首次提出光阱的概念; 1976 年, Ashkin 等^[6]于 10^{-6} mbar 真空环境下实现了熔融石英小球的光悬浮, 提出借助光力还可实现低阻尼环境的高精度传感; 1986 年, Ashkin 等^[7]利用经高数值孔径物镜聚焦的单束激光实现了对电介质微球的三维捕获, 标志着光镊技术的诞生。

得益于 Ashkin 等科研人员的开创性工作, 同时伴随着真空技术的不断突破, 悬浮光力传感技术应运

而生。该技术利用处于真空环境的光阱对微纳尺度的机械振子进行悬浮与囚禁, 并将待测物理量转换为光悬浮机械振子的状态变化量, 通过敏感出该微纳振子的运动参数, 实现物理量的高精度测量。由于真空环境下的机械振子与外部环境的热噪声与振动完全隔绝, 悬浮光力传感技术可实现极高的探测灵敏度与分辨率。除此之外, 该技术还具有非接触、高稳定性、易于小型化等特点^[8]。与基于原子体系的量子传感方案不同^[9-12], 悬浮光力传感技术采用的敏感微粒尺寸在纳米至微米尺度, 为新一代量子传感技术的发展提供了一条独特路径。

悬浮光力传感技术在精密测量^[13]领域已取得多项突破, 精度正逐步逼近量子极限。同时, 悬浮光力传感技术还在微观热力学研究^[14-15]、暗物质观测^[16]、宏观量子态操控^[17-18]等诸多基础前沿领域起到了显著作用, 让科学家们更加深刻地理解经典与量子的边界问题, 验证更多的基本物理理论。2010 年, 美国德克萨斯州大学李统藏等^[19]借助悬浮光力传感技术观测了介观微球的布朗运动速度, 解决了约百年前爱因

收稿日期: 2023-04-03; 修订日期: 2023-05-06

基金项目: 国家自然科学基金 (11904405, 61975237)

作者简介: 张皓铭, 男, 博士生, 主要从事真空光镊方面的研究。

导师(通讯作者)简介: 肖光宗, 男, 副教授, 博士, 主要从事悬浮光力学与量子精密测量方面的研究。

斯坦所提出的实验观测难题。2019 年,奥地利维也纳大学 Delic 等^[20]通过悬浮光力传感技术将声子占有数降到了 0.43,首次实现了室温下宏观物质的量子基态冷却。

文中先从基本理论出发,详细介绍悬浮光力系统用于高精度传感时所需关键技术的研究进展,然后梳理并分析悬浮光力传感技术的典型应用,最后总结该技术未来的发展方向。

1 基本理论

1.1 光力与光阱

作为传感单元的微纳尺度粒子被聚焦光束照射后,大量光子的动量转移至微粒,致使微粒受到力学作用。光的作用力可分为沿光束传播方向的散射力和指向光束聚焦中心的梯度力^[21]。前者来源于光子的散射吸收等动量转移过程,具有将微粒“推出”原位的作用;后者来源于不均匀的光场分布,具有将微粒“拉回”原位的作用。

基于以上力学效应实现对微粒三维束缚的势阱,称为光阱。图 1 列举了不同尺寸的微粒常用的光阱结构^[22],主要包括:

(1) 单光束光阱。水平方向单光束光阱结构常用于捕获小尺寸的纳米级粒子。经高数值孔径的物镜^[23]或抛物面镜^[24]聚焦的光束所形成的轴向散射力相对较小,主要依靠梯度力实现对微粒三维囚禁。竖直方向单光束光阱利用低聚焦单光束则可捕获数十波长量级尺寸的微米级粒子,轴向散射力与微粒重力平衡,梯度力则为微粒提供三维束缚作用^[13]。

(2) 双光束光阱。低聚焦双光束光阱结构^[19]常用捕获大尺寸的微米级粒子,两束相向传播、且偏振态正交的线偏振光可形成稳定的三维势阱。但该类光阱对光学元器件的安装精度要求较高,其中的异面错

位误差将导致微粒出现公转^[25-28],可使用针孔对准等方法予以解决^[29]。

1.2 力学测量原理

在线性范围内,微粒在光阱等效平衡位置附近所受的光学回复力 F 与之对应的位移 x 成正比关系,满足胡克定律:

$$F = -kx \quad (1)$$

式中: k 为光阱刚度; x 为微粒的质心位移,也是实现悬浮光力传感常用的输出量。

采用简谐振子模型分析悬浮光力传感过程。以最简单的力学测量为例,微粒的一维线性质心运动方程表示为:

$$m\ddot{x} + m\Gamma_0\dot{x} + kx = F_{in} + F_n \quad (2)$$

式中: m 为微粒的质量; Γ_0 为单位质量阻尼系数^[15]; F_{in} 和 F_n 分别为系统的输入力和噪声力。通过求解公式 (2),即可得出微粒质心位移所对应的力学量。

敏感微粒的动力学特性决定了悬浮光力系统的噪声基底。在零输入的气体环境下,微粒与气体分子发生随机碰撞而进行受限无规则布朗运动,公式 (2) 即被简化为描述微观热力学特性的 Langevin 方程,其中的噪声力由热随机力主导,即:

$$F_n = \sqrt{2k_B T m \Gamma_0} \xi(t) \quad (3)$$

式中: k_B 为 Boltzmann 常数; T 为 Kelvin 温度; ξ 为归一化的白噪声信号,满足平稳随机过程条件。

以热噪声为主要噪声的悬浮光力系统中,最小可探测力表示为^[29]:

$$F_{min} = \sqrt{4mk_B T \Gamma_0 b} \quad (4)$$

式中: b 为测量带宽。根据公式 (4) 不难发现,微粒的随机运动直接决定测量灵敏度的极限^[30]。

悬浮光力传感使用的机械振子具有 ng 以下量级的超低检测质量。光力悬浮不仅免去了机械支承带来的摩擦损耗,保证高真空环境下系统的超低阻尼,还避免了机械支承导致的应力时间效应,使得系统具有高稳定性^[8]。因此,悬浮光力系统在室温条件即可实现超高灵敏度与分辨率的力传感,具有极高的品质因数。基于悬浮光力系统的力学传感原理可被推广至加速度^[31]、电场强度^[32]、力矩^[33]、温度^[34]等多类物理量的精密测量上,具有重要的应用价值。

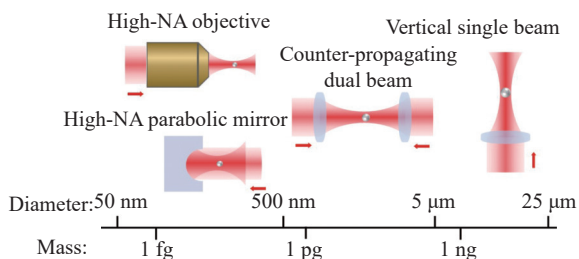


图 1 不同尺寸微粒需要的光阱结构^[13,22]

Fig.1 Various optical traps for particles of different sizes^[13,22]

2 关键技术研究进展

微粒被装载至光阱区域后,在光场中稳定悬浮;通过探测微粒的质心运动,并采用闭环反馈控制抑制系统噪声,超灵敏悬浮光力传感得以实现。上述传感过程中,主要包含初始起支、光力增强、位移测量、输出信号标定和等效反馈冷却等关键技术。

2.1 初始起支技术

待悬浮的微粒克服与初始表面之间的 Van der Waals 力、毛细力等黏附力和自身重力作用,以一定的初速度被快速投送至光阱区域,并被光场捕获,该过程被称为起支。起支的主要方法有雾化法^[22]和振动激励法^[35]。

雾化法主要应用在纳米级粒子的悬浮光力系统中。携带粒子的易挥发溶液通过超声波、压缩空气或者微孔被雾化成气溶胶后,被气流装载至光阱区域,即可实现微粒的起支。雾化起支的优势在于操作简单,2012~2013年,西班牙光子研究所 Gieseler 等^[22]与奥地利维也纳大学 Kiesel 等^[36]先后通过雾化起支实现了单个纳米球的光学捕获。但由于雾化法可能出现多个微粒被同时捕获的情形,难以一次性精准捕获单个目标微粒,效率较低。

振动激励法主要应用在微米或亚微米级粒子的悬浮光力系统中。压电陶瓷对表面附着待悬浮微粒的载体基板施加振动激励后,微粒所受的瞬时惯性力大于初始的黏附力和自身重力,从而脱离载体基板表面并落入光阱区域,实现微粒的起支。2011年,美国德克萨斯州大学李统藏^[37]将基板置于光阱正上方振动完成起支。2020年,国防科技大学肖光宗等^[35]针对双光束光纤式光阱系统,提出了一种可实现单微粒重复起支的压电陶瓷振动法,保证微粒在合适的振动模式下以合适的速率进入光阱区域,如图 2 所示。

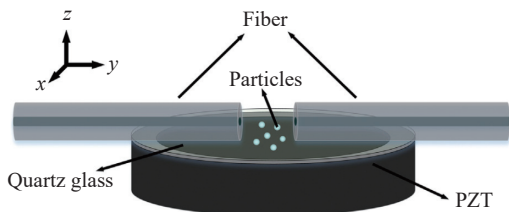


图 2 压电陶瓷振动激励起支的原理示意图^[35]

Fig.2 Schematic diagram of the particle loading structure by piezoelectric ceramics^[35]

2022年,该团队面向片上光力加速度计的实用化需求,补充设计了微粒起支的闭环自动控制环节^[38]。基于上述工作,该团队在国际上率先解决了悬浮光力传感技术走向实用的“卡脖子”难题,避免了雾化起支过程中出现的多微粒捕获和非捕获微粒污染捕获室内壁等问题。

除此之外,研究人员还提出了脉冲激光激励法^[39]、热熔法^[40]和碰撞法^[41]等新型起支方案。2018年,浙江大学傅振海等^[39]针对双光束光纤光阱系统提出了一种可实现单微粒起支的脉冲激光法,利用脉冲激光的光动量为微粒提供足够高的瞬时加速度,从而使微粒脱离基板并被光阱捕获。该技术可拓展应用至其他悬浮光力系统,但需要精确控制脉冲激光的束腰半径。

2.2 光力增强技术

光力增强的目的提高被捕获微粒的三维位置稳定性,从而提升悬浮光力系统的传感性能,主要采用提高光阱刚度^[15]和光阱效率^[42-43]两种实现途径。虽然直接提高捕获光功率可快速提高被捕获微粒的位置稳定性,但随之而来的热噪声会降低传感性能。在保持较低捕获光功率的前提下,可通过调制光场、改性环境介质或者优化光力探针等方式增强光梯度力或者降低光散射力,从而实现总光力的提升。这些方法不仅能够避免捕获光功率增加所带来的额外功耗,也有助于拓宽悬浮光力传感技术的适用范围,便于光镊的集成化。

2.2.1 调制光场

光与微粒之间相互作用的强度大小,在一定程度上依赖于光场的相位、振幅和偏振等空间分布参数,因此可通过直接或间接调制光场的方式提升光力。

直接调制采用算法优化入射场、改进散射场的方法来实现光力增强^[44-45]。2015年,澳大利亚昆士兰大学 Taylor 等^[44]通过采用相位优化的结构光场照射 SiO₂ 微粒,使得出射场的强度重分配,得到比高斯光场捕获条件下高出 27 倍的横向光阱刚度,信噪比则提高两个数量级。

间接调制借助于空间光调制器等光学元件产生诸如圆环形 Airy 光束^[46]、空心高斯光束^[47]、矢量光束^[48]等特殊光束,可以改善光场强度梯度在径

向或者纵向上的分布,从而相应地增强光梯度力或者降低光散射力。借助于超材料或超表面来产生具备局域场增强效应的近场光镊,也能提升光梯度力^[47,49]。2013年,比利时布鲁塞尔自由大学 Gimis 等^[50]在光波导表面覆盖了一层单负超材料,使得原本指数衰减的倏逝波振幅被放大,从而实现光梯度力增强。

2.2.2 改性环境介质

将微粒所处的环境介质设计成具有特定光学属性的材料或者结构,这不仅有助于实现光力增强,而且能观测到光与物质相互作用的新现象,为悬浮光力学的研究注入新的活力。

光子晶体波导^[51]、六方氮化硼缝隙波导^[52]、纳米天线阵列超表面^[53]等精心设计的结构化背景,可以优化入射光波矢的拓扑结构,从而提升光力大小。2015年,英国约克大学 Scullion 等^[51]发现光波导中的慢光效应在特定波长的照射下得到激发,致使光波导中的电磁能量增加,在光波导中被捕获微粒所受的光力相应地得到提升。

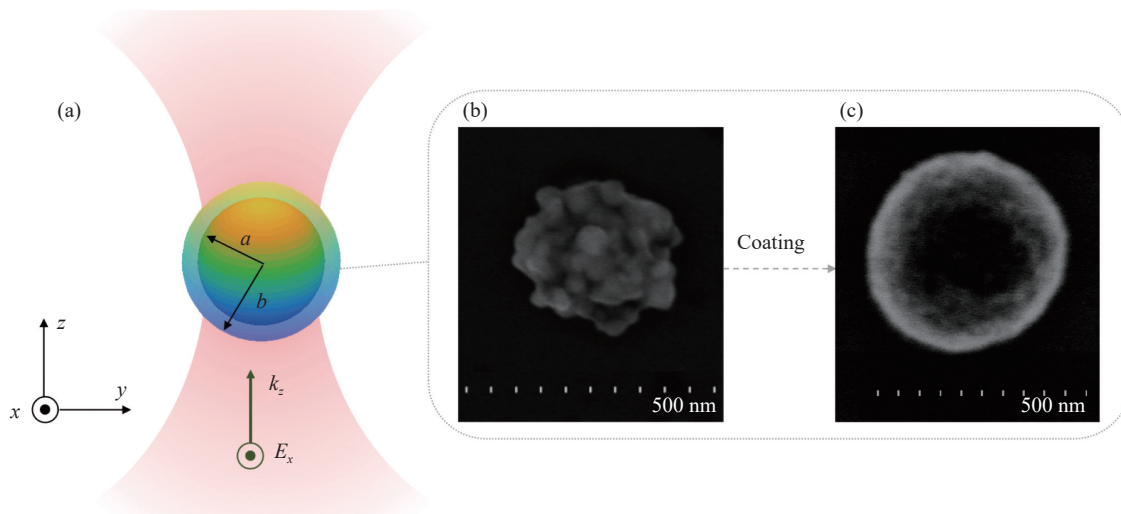
局部温度梯度场形成的光泳力也可实现微粒的紧束缚。2013年,美国普林斯顿大学 Qian 等^[54]在聚苯乙烯颗粒的一侧镀上 Au 薄膜,使得颗粒表面约 7 °C 的温度差诱导产生与光散射力相平衡的约 0.1 pN 左右的光泳力,提高了轴向的光阱刚度。

2.2.3 优化光力探针

光力增强亦可通过优化光力探针的介电常数、结

构、形状等光学属性予以实现。当前成熟的微纳加工和化学合成工艺为光力探针的优化设计提供了便利,因此相较于调制光场和改性环境介质,优化光力探针是一种更为简单直接的方案。

采用金属微粒或者特殊形状微粒可实现光力增强。1994年, Svoboda 和 Block^[55]捕获并测量得到作用在 Au 纳米颗粒上的光力比同直径的乳胶纳米颗粒的高 6.5 倍。2014年,英国布里斯托大学 Phillips 等^[56]设计并制造出折射率仅为 1.5 的复合结构光力探针,如图 3 所示,打破了需要高折射率对比度才能实现光梯度力增强的常规思路。借助于以上转换材料的吸收共振机制也可实现光力增强。2021年,澳大利亚悉尼科技大学 Shan 和 Wang 等^[57]发现,在共振波长的激发下, NaYF₄:20%Yb³⁺ 纳米颗粒的等效极化率实部显著提升,所受光力比同直径的 Au 纳米颗粒高出 30 倍。核壳型微粒能在降低散射力的同时增强光阱刚度。2012年,德国德累斯顿工业大学 Jannasch 等^[58]在悬浮光力系统中稳定捕获了高折射率的锐钛矿 TiO₂ 核壳型微粒。在克服尺寸公差和拓宽生物兼容性方面,国防科技大学彭妙等^[59]于 2022 年设计了图 3 中 ZrO₂@TiO₂ 核壳型纳米颗粒。该纳米颗粒与同直径的 SiO₂ 颗粒相比具有更好的束缚效果,其径向和轴向光阱刚度分别提升了 5 倍和 9 倍。



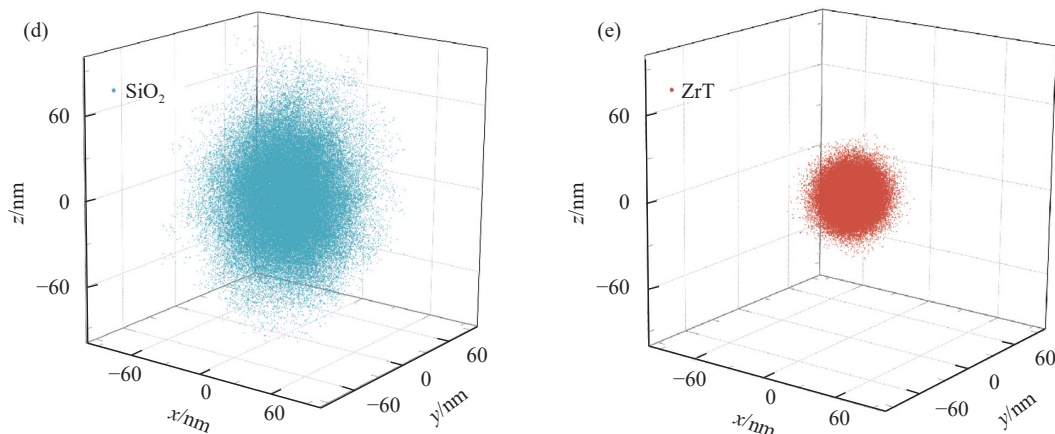


图 3 被光阱捕获的 $ZrO_2@TiO_2$ 纳米颗粒及其位置波动示意图^[59]

Fig.3 Schematic diagram of shape and position fluctuation of an optical-trapped $ZrO_2@TiO_2$ nanoparticle^[59]

在上述三种光力增强方案中,调制光场方案通常需借助于空间光调制器或者复杂光学元器件实现,损耗较大;改性环境介质方案对实验系统要求简单,但应用范围受限。此外,这两种方案基本上只提升了探针在某一个维度上的光力或者光阱刚度。优化光力探针是一种直接提高微粒位置稳定性的方案,合成工艺成熟,实验系统简单,且能实现三维光力增强,但在理论分析的过程中,需要考虑探针的合成冗余度和尺寸公差等问题。

2.3 位移测量技术

微粒的质心位移作为悬浮光力系统的输出信号,需被实时准确地读取出来,从而为下一步的反馈控制和信号分析提供精确的参考信号。根据探测原理的不同,可将位移测量方式划分为图像分析法和焦面干涉法两大类。

图像分析法借助 CCD 或 CMOS 等图像传感器拍摄被捕获粒子的图片或视频,通过选取合适的算法分析图像的灰度特征从而提取出位移信号^[60]。但数据采集频率受到相机帧速限制,因此该方案一般用于监测微粒是否被捕获以及有无粒子团聚,一般作为辅助观察手段^[28,34]。

焦面干涉法又称散射光探测,是目前气体环境下最常用的位移探测方法:激光照射微粒发生散射、散射光与未散射光发生干涉、干涉波被处于聚光镜后焦面的探测器接收。根据散射光的传输方向,可将探测方法细分为图 4 中的前向散射法 (Forward scattering) 与背向散射法 (Backward scattering)。美国密歇根大

学 Gittes 等^[61]与西班牙光子研究所 Volpe 等^[62]分别使用 Rayleigh 近似和 Mie-Debye 散射理论详细推导了两种散射法的焦面干涉探测模型,并比较出前向散射法输出的光电信号线性度比背向散射法的更高。

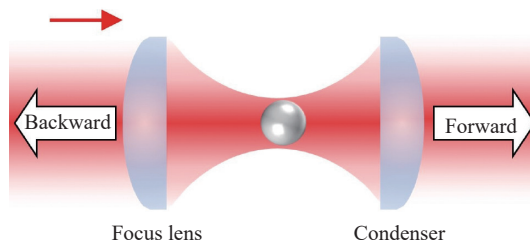


图 4 焦面干涉法原理示意图^[62]

Fig.4 Schematic diagram of focal-plane interferometry^[62]

悬浮光力系统中的位移测量方案主要包括四象限探测器法、平衡探测器法和光纤探测法。

2.3.1 四象限探测器法

四象限探测器 (Quadrant Photodetector, QPD) 法将后焦面接收到的散射光信号转换为电压信号,由此得出微粒的运动信息^[63]。如图 5 所示, QPD 的光敏面按四个象限划分,位移的径向信号为两对象限面所接收的光强差,轴向信号则与四个象限面所接收的总光强变化量有关,一般可借助另一束参考光消除探测器总光强中的偏置分量。

2014 年,英国伦敦大学 Millen 等^[34]借助 QPD 探究了加热纳米颗粒表面的气体非平衡态,不仅获得了优于图像分析法的百纳米量级位移探测分辨率,且由此发现悬浮光力传感技术在纳米尺度的温度测量上

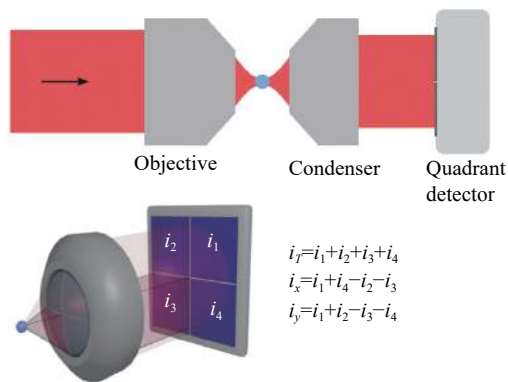


图 5 QPD 探测原理示意图^[63]

Fig.5 Schematic diagram of QPD detection^[63]

具有潜在的应用价值。2016 年,美国内华达大学 Ranjit 等^[64-65]借助 QPD 实现了数十纳米量级的位移探测分辨率和 zN 量级的力学探测分辨率。2017 年,国防科技大学熊威等^[60,66]分析了微粒半径、束腰间隔、聚焦物镜数值孔径、捕获光功率不对称度等因素对双光束光纤式光阱系统中 QPD 测量的影响。2021 年,浙江大学祝训敏等^[67]通过在四象限探测器前增加可变光圈的方法,将径向和轴向的探测交叉耦合度分别降低了 49 dB 和 22 dB。2023 年,之江实验室王颖颖等^[68]从器件本身出发,不仅将 QPD 的共模抑制比提升至 45 dB,且保证入射光功率大于 1 mW 时的噪声性能仅受散粒噪声限制,有利于未来悬浮光力系统的小型化高灵敏度探测。

2.3.2 平衡探测器法

平衡探测器 (Balanced photodetector, BPD) 法通过将传输到两个光敏端口的散射光信号差分转换为电压信号,得出微粒的运动信息。2011 年,美国德克萨斯州大学李统藏等^[19]针对双光束光阱系统设计了基于 D 形镜和 BPD 的差分位移探测方案,准确地测出了微粒的受限布朗运动。该方法已在悬浮光力系统中得到了广泛应用,其基本原理如图 6 所示。带有尖锐边缘的 D 形棱镜将经微粒前向散射的光均匀地沿上下或左右方向等分,两束光经透镜聚焦后分别打在 BPD 的两个光敏面上,输出两个端口的差分信号。这种方法的优势在于,由于 BPD 的响应带宽可达到 75 MHz,系统可获得较高的共模抑制比和信噪比,位移探测灵敏度达到了 $39 \text{ fm}/\sqrt{\text{Hz}}$ ^[69]。

在此基础上,提升测量精度成为了新的研究重

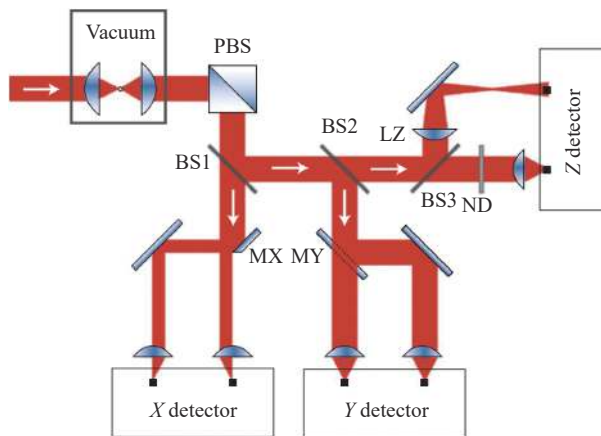


图 6 基于 D 形镜和 BPD 的差分位移探测方案原理示意图^[19,68]

Fig.6 Schematic diagram of the displacement differential detection scheme based on D-shape mirrors and BPD^[19,68]

点。2019 年,美国斯坦福大学 Rider 等^[70]针对单光束光阱系统提出了外差探测的方案,获得了 $10 \text{ pm}/\sqrt{\text{Hz}}$ 量级的径向位移探测灵敏度。2022 年,国防科技大学陈志洁等^[71]从工程应用角度出发,分析了差分探测方案中 D 形棱镜的角度和平移安装误差对探测性能的影响,进一步提升了差分探测方案的实用性能。BPD 的电流差分结构能够去除共模直流信号,仅将包含位移信息的交流光电流放大,因此较 QPD 而言具有更高的时间分辨率和信噪比^[68]。

2.3.3 光纤探测法

随着微透镜加工等光纤技术的快速发展,出现了通过光纤收集散射光来探测光悬浮微粒运动信息的方法。2005 年,美国加利福尼亚大学 Jensen 等^[72]设计出四光束光纤式光阱芯片,通过光谱仪分析经多模光纤收集的两种波段的散射光强比,由此得出的位移信号具有微米量级的空间分辨率。2008 年,美国德克萨斯州大学 Chavez 等^[73]通过多模光纤分束器差分处理散射光,并借助 BPD 输出信号,成功测量出光悬浮微粒的布朗运动,空间分辨率达到 0.1 nm 量级。2017 年,美国伍斯特理工学院 Ti 等^[74]设计出基于倾斜式光纤的位移测量方案,通过一对相对于水平面倾斜的光纤同时进行微粒的捕获与探测,实现了 2 nm 的空间分辨率和 150 MHz 的超高探测带宽。2019 年,国防科技大学熊威等^[75]针对传统光纤式双光束光阱结构提出了如图 7 所示的全光纤回光干涉测量法,精准测量出

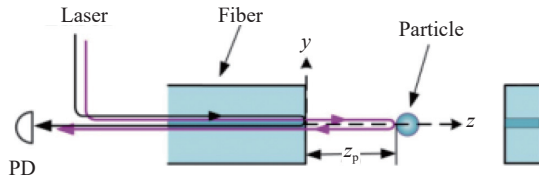


图 7 全光纤回光干涉测量的原理示意图^[75]

Fig.7 Schematic diagram of all-fiber back-light interferometry^[75]

微粒的运动速度,有利于悬浮光力传感系统未来的集成化。

2.3.4 位移探测方案的对比

精确的位移探测技术决定了悬浮光力传感具有高灵敏度的特征。在上述三种位移测量方案中, QPD 易于芯片集成化,但精度普遍不高; BPD 的探测性能较好,是目前悬浮光力传感中最常用的探测器,但利用 BPD 的探测光路结构复杂,不利于系统小型化; 光纤探测法易于集成化,但对环境振动十分敏感,系统的稳定性与前二者相比较弱。

除了以上三种位移探测方案外,近年来出现了新型探测方法。2021 年,澳大利亚昆士兰大学 Madsen 等^[14]提出了一种基于分裂半波片和单模光纤的结构光探测方案,获得了 $1.5 \text{ fm}/\sqrt{\text{Hz}}$ 的超高位移探测灵敏度。其实验结构如图 8 所示,经过微球的探测光束可以分解为沿捕获中心对称的未散射捕获场

和携带微粒位移信息的反对称信息场。探测光束经过分裂波片后,场的对称性发生翻转,信息场翻转成对称性的分量,而捕获场翻转成反对称分量。因为单模光纤的导模是高斯对称的,所以占大部分的捕获场可被完全滤除。相较于传统的焦面干涉法,该方法不仅具有更高的信噪比,而且可在任意的强光阱中结合市面上的商用探测器使用,具有更低的搭建成本。

2.4 输出信号标定技术

经光电探测器输出的电学信号需要通过校准系数转换成微粒的质心位移,其中的校准系数可通过标定技术得到。一般而言,在微粒位移较小时,输出的电信号 U 和微粒位移 x 具有良好的线性关系,可表示为:

$$U = Cx \quad (5)$$

式中: C 表示线性校准系数。可根据光阱的分布特性进行不同方式的输出信号标定。

当系统处于高压的热平衡环境时,校准系数根据能量均分定理标定^[15]。当系统处于高真空环境且温度未知时,则可通过施加与系统谐振频率相近的交流电场,驱动带电微粒振动,最终通过位移电信号得出线性校准系数^[76]。由于微粒质量和外电场的误差较大,致使该标定方法的精度较低。

被束腰半径较小的紧聚焦光束俘获的纳米颗粒所处的光阱具有明显的非线性特征,可通过线性或非线性手段进行标定。线性手段利用热平衡条件下的平均动能仍与热能相等的特点,将原始的位移电信号依照采样频率转换成速度电信号再标定^[15,76]。

非线性手段利用光阱的非线性项进行相应的拟合处理,可获得较好的精度。2017 年,英国南安普顿大学 Vovrosh 等^[23]针对抛物镜聚焦的光阱结构,通过提取其后向探测得到的谐振频率和二倍频处的电信号,在微粒质量等参数未知的条件下实现非线性标定。2020 年,中国科学技术大学孙方稳等^[77]利用 Duffing 项描述捕获光场的非线性部分,通过幅值锁定测量出不同振幅下微粒的非线性谐振频移,在拟合光束半径后得出线性转换系数,其原理如图 9 所示,该方法最终实现了 1% 的超低位测量误差率。

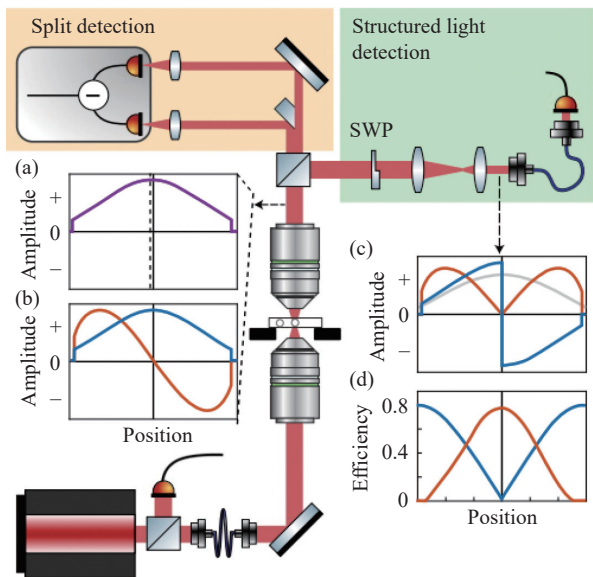


图 8 使用结构光探测的悬浮光力系统^[14]

Fig.8 Levitated optomechanical system using structured-light detection^[14]

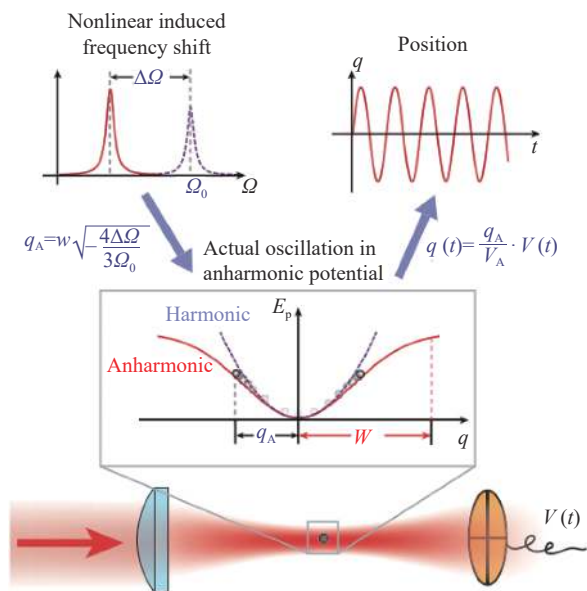


图 9 未知微粒质量时的非线性标定原理图^[77]

Fig.9 Principle of nonlinear calibration without the information of particle mass^[77]

2.5 等效反馈冷却技术

在低阻尼的真空环境下,需增加反馈冷却模块,抑制微粒热噪声的同时扩大系统量程。等效反馈冷却技术最早由朱棣文团队^[78]提出,用于解决原子稳定捕获的问题,后推广至悬浮光力传感中对微纳尺度粒子的操控。目前,主要使用的冷却方法有速度反馈冷却、参量反馈冷却和腔冷却三种。

2.5.1 速度反馈冷却

速度反馈冷却的物理模型较简单。将微粒的实时位移量微分处理成速度量后,施加一个与速度成正比的外部“反馈阻尼力”,从而抑制微粒的波动。该反馈力可表示为:

$$F_{cool} = -\Gamma_c \dot{x} \quad (6)$$

式中: Γ_c 表示冷却阻尼系数,又称冷却度,单位为 rad/s 或 Hz, Γ_c 可由光动量和静电场提供。

2011 年,美国德克萨斯州大学李统藏等^[69]首次提出了基于光动量的速度反馈冷却方案,并确定了描述微粒质心运动的“等效温度” T_{eff} 的概念。该方法的基本原理如图 10 所示,经微分和低通滤波处理后的速度信息被传送至声光调制器(Acoustic-optical Modulator, AOM), AOM 实时调节冷却光光强而改变施加于微粒的散射力,最终完成冷却控制。在该系统中,相互正交的三束冷却光分别独立控制微粒的三维运动,

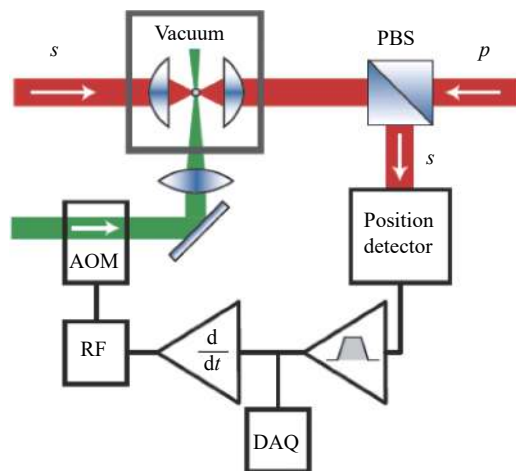


图 10 基于光动量的速度反馈冷却原理图^[69]

Fig.10 Principle of velocity feedback cooling principle based on optical momentum^[69]

SiO_2 微米颗粒在 5.2×10^{-2} mbar 真空环境下的径向等效温度降至 1.5 mK^[69]。

2020 年,美国耶鲁大学 Moore 等^[79]则通过光动量速度冷却的方法将微粒的径向平均等效温度降至 50 μK ,这是目前基于大尺度微粒的悬浮光力系统所被报道的最低等效温度。这种借助光反馈力冷却粒子的方式也被推广到了真空悬浮磁力系统中。2021 年,美国蒙大拿州立大学 Lewandowski 等^[80]使用该方法将常温下 60 μm 直径微粒的等效温度冷却至 9 K。

基于静电场的速度反馈冷却则通过静电场形成 Coulomb 力反馈控制带电微粒的运动,在近年来运用广泛,其基本原理如图 11 所示,位移信号经微分处理后被传送至平行电极板,由电极板施加静电力。

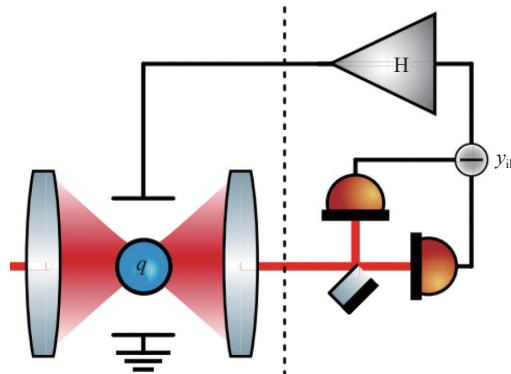


图 11 基于静电场的速度反馈冷却原理图^[81]

Fig.11 Principle of velocity feedback cooling principle based on electrostatic field^[81]

2018 年, 瑞士苏黎世联邦理工学院 Tebbenjohanns 等^[81]运用电场力反馈冷却, 在 10^{-8} mbar 的超真空状态下将纳米颗粒的等效温度降低至 100 μ K。西班牙光子研究所 Conangla 等^[82]随之跟进, 设计出基于锁相放大的电场-参量反馈相结合的单光束悬浮光力系统。

2.5.2 参量反馈冷却

参量反馈冷却的基本原理如图 12 所示。微粒的位移信号依次经过倍频和相移后, 所合成的反馈信号施加在 AOM 或电光调制器 (Electro-optic Modulator, EOM) 上, 从而实时降低微粒在光阱中的机械能, 达到冷却效果。实际操作体现在调制光功率来稳住微粒的三维空间位移, 光功率调制信号的频率是位移信号的两倍, 通过相位匹配保证调制信号与位移信号的相位差为零。参量反馈冷却的反馈力为:

$$F_{\text{para}} = -k_{\text{para}}x^2\dot{x} \quad (7)$$

式中: $k_{\text{para}} = m\omega_0\Gamma_c$ 表示参量反馈增益。

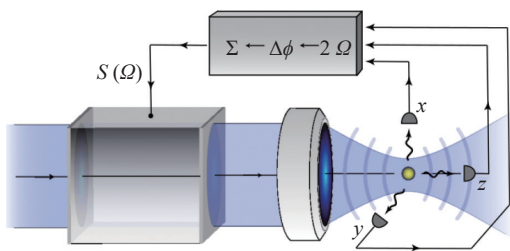


图 12 参量反馈冷却原理图^[23]

Fig.12 Principle of parametric feedback cooling^[23]

西班牙光子研究所于 2012 年将参量冷却方案运用于单光束悬浮光力的微粒冷却中, 获得了三轴 50~130 mK 的等效温度^[22], 并于 2016 年冷却至 450 μ K^[83]。同年, 瑞士苏黎世联邦理工学院 Novotny 等^[84]成功在 6.9×10^{-9} mbar 真空环境下悬浮直径 100 nm 的纳米颗粒, 并将其参量冷却至 145 μ K。2017 年, 英国南安普顿大学^[23]利用抛物面反射镜进行微粒悬浮与冷却, 在 10^{-6} mbar 量级真空度下获得了 3 mK 的等效温度。2022 年, 瑞士苏黎世联邦理工学院 Vijayan 等^[85]将轴向参量冷却与全光调制技术相结合, 实现了双纳米粒子体系的探测与冷却, 并获得了 17 mK 的等效温度。

2.5.3 腔冷却

腔冷却法的基本原理如图 13 所示, 在腔频大于光频的激光红失谐状态下, 光子吸收掉微粒的机械

能, 从而实现冷却^[86]。该方法主要基于谐振腔的激光技术, 大幅提升了探测散射光的收集效率^[29]。2013 年, 奥地利维也纳大学 Kiesel 等^[36]率先将腔冷却的方法运用到悬浮光力系统中, 在 4 mbar 真空环境下将半径 169 nm 左右粒子的等效温度冷却至 64 K。2019 年, 奥地利维也纳大学 Delic 等^[20]借助腔冷却技术, 在室温环境下首次实现了光悬浮纳米颗粒的一维量子基态冷却。2023 年, 瑞士苏黎世联邦理工学院 Piotrowski 等^[87]在此基础上实现了二维量子基态冷却。

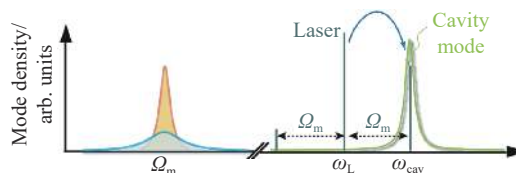


图 13 腔冷却原理示意图^[86]

Fig.13 Schematic diagram of cavity cooling^[86]

2019 年, 土耳其毕尔肯大学 Volpe 等^[88]首次提出在环形激光有源谐振腔内捕获微粒的光阱结构, 根据微粒位移引发的光散射效应实时调节捕获激光的功率, 从而实现微粒位移的自主反馈控制, 有望将腔冷却的微粒尺度拓展到微米尺度。国防科技大学邝腾芳等近年来借用内腔自反馈技术, 分别设计出单光束^[89-90]与双光束^[91]有源悬浮腔光力系统, 其光纤-空间光复合腔环形激光器结构如图 14 所示。该团队不仅在低数值孔径的物镜聚焦态下完成微粒光悬浮, 且对比发现双光束自反馈有源悬浮腔光力系统与单光束悬浮腔光力系统相比具有单位光强内更高的束缚效率, 如图 15 所示。2022 年, 该团队与湖南师范大学景辉团队合作, 使用图 14(b) 所示的双光束有源悬浮腔光力系统成功实现高品质的非线性声子激光^[92], 在大尺度微粒的量子态制备和相干控制等潜在的基础研究道路上迈出了重要一步。

在上述三种等效反馈冷却技术中, 速度反馈冷却的原理简单, 可推广至悬浮百微米量级的磁阱系统, 但需引入额外的光束或静电场, 实验装置复杂; 参量反馈冷却只需周期性调制捕获光束, 实验装置简单, 但需考虑光场复杂的非线性特征; 腔冷却无需信号反馈即可将光悬浮微粒冷却至量子基态, 但通常微粒的尺度被限制在纳米量级, 且微粒三维运动之间的耦合程度较高。

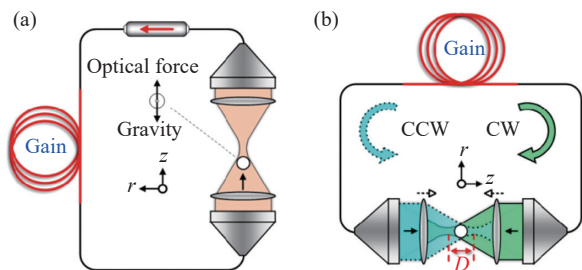


图 14 基于内腔自反馈技术的有源悬浮腔光力系统结构示意图。

(a) 单光束有源悬浮腔光力系统^[89-90]; (b) 双光束有源悬浮腔光力系统^[91]

Fig.14 Schematic diagram of levitated optomechanical systems with active cavity based on intracavity self-feedback technology. (a) Single-beam structure^[89-90]; (b) Counter-propagating dual-beam structure^[91]

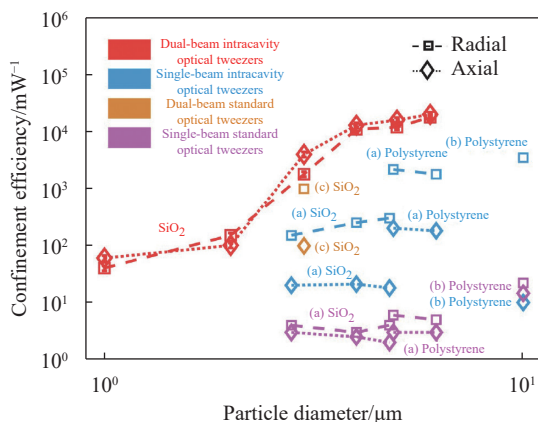


图 15 不同悬浮光力系统的束缚效率对比^[91]

Fig.15 Comparison of confinement efficiency of different levitated optomechanical systems^[91]

3 典型应用

悬浮光力传感技术可实现多种物理量的精密测量, 具有极高的探测灵敏度与品质因数, 在前沿交叉领域有着十分重要的应用前景。

3.1 极弱力测量

极弱力是悬浮光力传感应用中最典型的被测物理量。正如前文所述, 悬浮光力系统在室温条件下即可实现超高灵敏度的力学传感。基于悬浮光力的极弱力测量, 不仅能实现在微纳尺度下非牛顿引力和短程力的精密传感, 而且有助于未来在亚波长尺度下从事高频引力波探测^[93]、太空实验^[16]等天文学研究。通过降低环境压强并施加反馈冷却, 悬浮光力系统的

力学灵敏度从最初的 $10^{-18} \text{ N}/\sqrt{\text{Hz}}$ 提升至 $10^{-21} \text{ N}/\sqrt{\text{Hz}}$ 量级, 分辨率和持续工作时间也分别提升至 10^{-22} N 和千秒量级^[94]。表 1 列出了借助悬浮光力传感技术所实现的极弱力探测灵敏度。

表 1 基于悬浮光力传感技术所实现的极弱力探测灵敏度
Tab.1 Weak force detection sensitivity based on levitated optomechanical sensing technology

Year	Group	Force sensitivity/ $\text{N} \cdot \sqrt{\text{Hz}}^{-1}$
2016	Univ. of Nevada ^[65]	1.6×10^{-18}
2017	Univ. of Southampton ^[95]	3×10^{-20}
2020	Univ. of Vienna ^[20]	1.71×10^{-20}
2022	Zhejiang Lab. ^[94]	6.33×10^{-21}

3.2 加速度测量

悬浮光力传感技术在加速度测量上已有较大进展, 在惯性导航领域具有广阔的应用前景^[96]。2010 年, 美国麻省理工学院 Kotru 等研究了基于双光束光阱的光力加速度计^[97-98], 采用力平衡控制回路检测并控制两束光的光功率, 最终实现微粒的加速度实时测量。目前, 光力加速度计的实体样机仍未进入到仪表测试和投入使用阶段, 需重点解决提升精度和小型化等问题。

2017 年, 美国耶鲁大学 Moore 等^[31]借助垂向单光束光阱系统, 采用如图 16 所示的 1064 nm 波长捕获光悬浮仅 12 ng 质量的敏感微粒, 并通过 532 nm 波长的外探测光, 获得了系统在 10^{-6} mbar 真空度下 $0.4 \mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$ (g 为重力加速度) 的加速度探测灵敏度和 0.7 ng 的分辨率。2020 年, 该团队将压强降至 10^{-7} mbar 量级, 并采用电场标定的方式获得了频率为 55 Hz 下 $95 \text{ ng}/\sqrt{\text{Hz}}$ 的高灵敏度与 0.17 ng 的超高探测分辨率^[79]。

在小型化研究基础上, 国防科技大学吴宇列等^[99]设计了采用光学笼式系统结构和微机电系统 (Micro Electro-Mechanical System, MEMS) 技术的小型光力加速度计, 瞄准光力加速度计面向实用化的需求。系统采用小型激光二极管而非大型频准激光器, 在毫米级尺寸的工作腔中光悬浮 SiO_2 微米球, 并通过离心力转台标定参数^[100], 获得了最低为 0.49 mg 分辨率、4.4 mg 零偏等性能指标^[101]。

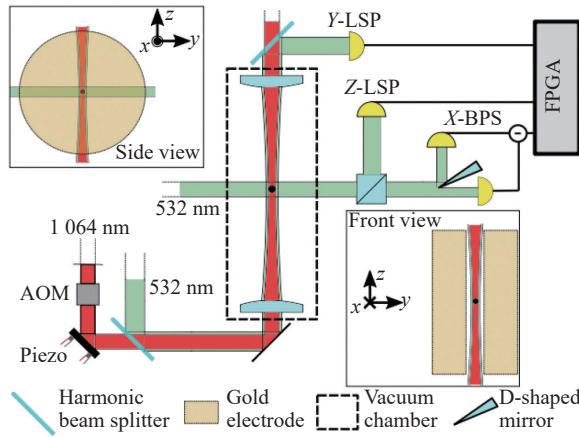


图 16 基于垂向单光束光阱的加速度传感系统结构示意图^[31]

Fig.16 Schematic diagram of levitated optomechanical systems for acceleration sensing applications based on vertical single-beam trap^[31]

3.3 微观质量测量

作为悬浮光力系统的传感单元,微纳尺度粒子质量的范围在 fg~pg 量级,可借助悬臂梁^[102]、纳米管^[103]等共振式微机械系统测量。相比于上述系统,使用悬浮光机械振子传感具有非接触的特点,可避免重复使用时对装置造成污染,因此可实现超灵敏的微观质量测量,从而准确识别出微观粒子的物理化学性质,在质谱测量、表面科学等化学领域具有较大的应用潜力。

2019 年,美国斯坦福大学 Blakemore 等^[104]通过静电场驱动测量光悬浮粒子的质量,获得了 pg 量级的测量偏差和 1.8% 的误差率。同年,西班牙光子研究所 Ricci 等^[105]通过交变电场驱动质量约为 4 fg 的光悬浮纳米颗粒,在 50 mbar 真空环境下实现的质量统计误差率仅 0.7%,如图 17 所示。2021 年,中国科学技术大学郑瑜等^[74,106]通过方波调制的参量冷却法,实现了纳米小球低于 2.2% 误差率的高精度质量传感。

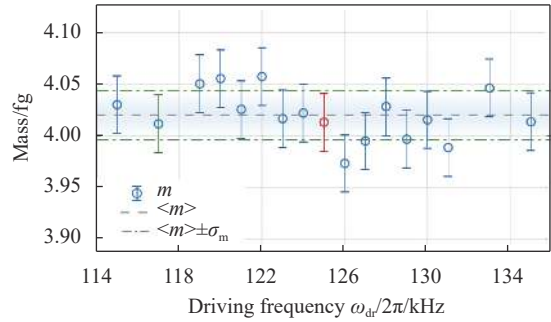


图 17 不同电压驱动频率下所测的微粒质量结果^[105]

Fig.17 Results of one nanoparticle's mass for different driving voltage frequencies^[105]

3.4 电学量测量

悬浮光力传感技术可实现包括电荷量和电场强度在内的电学量的精确测量,有望应用于通信感知、电气设备维修、地球物理勘探、水下目标探测等方面。一般而言,悬浮微粒自身带有一定电荷,电荷量经系统放电处理后得到放大增强^[15]。通过测量带电微粒在外电场中的运动,可以实现电学量的高灵敏度传感。

2014 年,美国耶鲁大学 Moore 等^[32]提出了一种使用真空悬浮光力系统检测粒子残余电荷的高灵敏度方案,使用垂向单光束光阱悬浮 5 μm 左右直径的带电微粒,并通过平行电容板施加高强度的均匀交变电场,如图 18 所示。该方案的电荷分辨率约为 $10^{-5} e$,证实了使用电场标定力灵敏度的可行性。经调节后的粒子净电荷量在均值为零的条件下符合高斯随机分布。2020 年,该团队使用该方法获得了 $0.95 \text{ aN}/\sqrt{\text{Hz}}$ 的极弱力灵敏度^[79]。

2022 年,之江实验室傅振海等^[107]借助悬浮光力传感技术,使用横向单光束光阱系统悬浮 145 nm 直

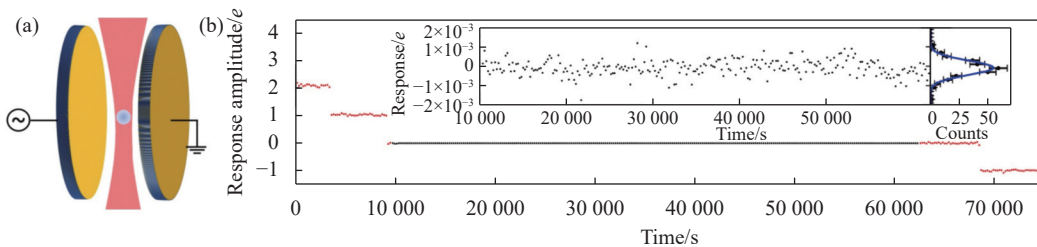


图 18 基于悬浮光力传感技术的电荷测量实验^[32]。(a) 原理示意图; (b) 带电微粒于外静电场作用下的径向位移响应

Fig.18 Charge measurement experiment based on levitated optomechanical sensing technology^[32]. (a) Schematic diagram; (b) Radial responses of the charged microsphere in the electric field

径、带电量 $100e$ 的纳米颗粒准确测量出三维电场强度,并实现了 $\mu\text{V}/(\text{cm}\cdot\sqrt{\text{Hz}})$ 量级的电场强度灵敏度,如图 19 所示。这项工作不仅完成了 MHz 以下的低频段电场探测,且首次将悬浮光力传感技术拓展到高灵敏电场传感领域。

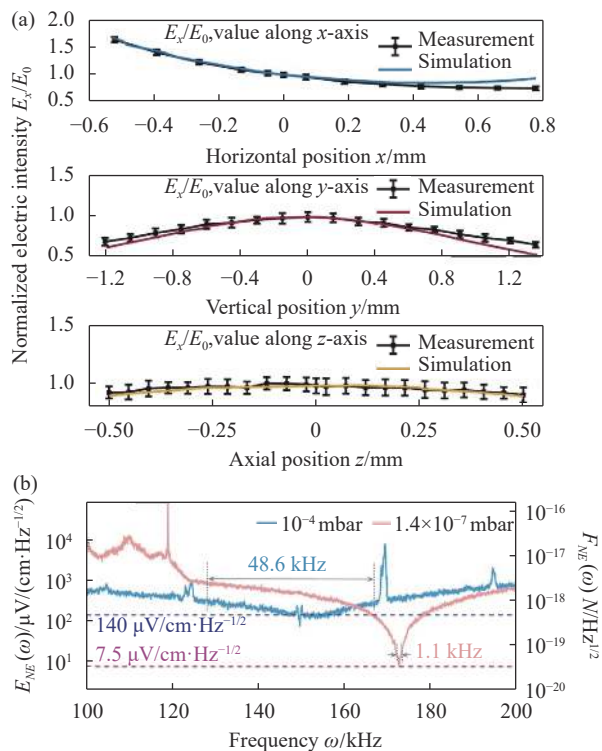


图 19 基于悬浮光力传感技术的电场强度测量结果^[107]。(a) 三维归一化电场强度;(b) 电场强度功率谱密度

Fig.19 Electric field intensity measurements based on levitated optomechanical sensing technology result^[107]. (a) Three-dimensional normalized electric intensity; (b) Power spectral density of electric intensity

3.5 光致高速旋转与极弱力矩测量

1936 年, Beth 通过实验验证了光子的角动量可被转移至物体上,致使物体在光学力矩作用下旋转^[108]。光的角动量可以分为自旋角动量^[109]和轨道角动量^[110],前者与光的偏振态相关,后者与光的相位有关。在低阻尼的真空环境中,形状或极化率各向异性的微粒受光子自旋角动量的作用可完成长时间的超高速旋转,具有典型的陀螺效应。因此,可借助光致旋转产生的陀螺效应研制出高精度的光力陀螺仪,精确测量出载体的角速度,在惯性导航领域具有一定的应用前景^[111]。

2013 年,英国圣安德鲁大学 Arita 等^[112]利用圆偏振光悬浮并驱动具有双折射特性的球霏石微粒以最大 5 MHz 的角速度高速旋转。2018 年,瑞士苏黎世联邦理工学院 Reimann 等^[113]在 10^{-5} mbar 真空环境下将 100 nm 直径的 SiO_2 纳米球的光致转速提升至 GHz 量级,实验的基本结构如图 20 所示。2021 年,山西大学张靖等^[114]施加冷却后将光致旋转的速度提高到了 6 GHz,如图 21 所示,这是目前所报道的最高转速。

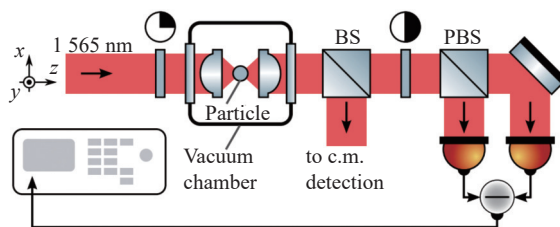


图 20 利用圆偏振光致高速旋转的实验装置图^[113]

Fig.20 Experimental setup of optically induced high-speed rotation by circularly polarized light^[113]

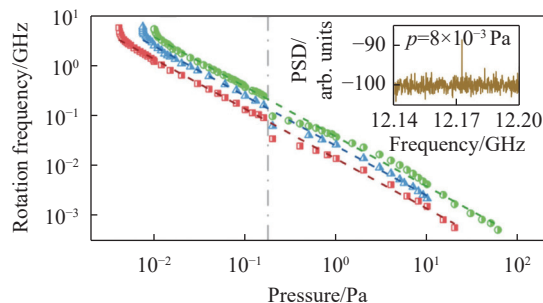


图 21 光致高速旋转的转速示意图^[114]

Fig.21 Rotation speed of optically induced high-speed rotation^[114]

和极弱力的测量原理相类似,光致高速旋转的微粒可敏感外界的角运动,实现超高灵敏的力矩传感。2016 年,美国普渡大学 Hoang 等^[115]将单粒子的光致转速提升至超过 1 GHz 以上后实现了 $10^{-29} \text{N}\cdot\text{m}/\sqrt{\text{Hz}}$ 量级的超高扭矩灵敏度。2018 年,该团队等成功实现了双纳米球哑铃的光致高速旋转,提供了 Casimir 力矩的一种探测方式,并于 2020 年将光致转速提升至 5 GHz 以上的同时,收获了 $4.2 \times 10^{-27} \text{N}\cdot\text{m}/\sqrt{\text{Hz}}$ 的扭矩灵敏度^[33]。

4 结论与展望

文中从悬浮光力传感原理出发,介绍了悬浮光力

传感关键技术研究进展和典型应用。随着量子信息、集成光学、微纳加工等现代科学技术的不断进步,悬浮光力传感系统的性能也在快速提升,悬浮光力传感技术已经在极弱力、加速度、微观质量、电学量和力矩测量领域上实现了精密传感,具有极大的潜在应用优势。其中,基于悬浮光力系统的加速度计克服了机械支承带来的机械摩擦、同时隔绝了环境振动噪声和热噪声,已经实现了 ng/\sqrt{Hz} 量级的灵敏度,有望应用于长航时自主导航、重力勘探和空间非保守力测量等多学科领域。除此之外,悬浮光力传感技术在宏观量子态操控、声子激光等新兴前沿领域展现出惊人的潜力,为基础物理研究提供了重要的工具。

国际上,悬浮光力传感技术正沿着“高精度”和“集成化”两条路线发展,前者面向基础研究需求,主要采用空间光学元件,追求测量极限,需通过优化装载真空腔体、光束整形、提高电学器件共模抑制比、反馈控制等手段不断降低系统固有噪声;后者面向传感应用需求,更加追求实用化和工程化,未来需交叉融合集成光学、集成电路、微纳加工等先进的技术,进一步提高集成度和综合性能。

我国悬浮光力传感技术的研究起步与国外研究相比略晚,大部分传感装置尚处于原理样机的探索阶段,但近年来也取得了可喜的进步,初始起支、真空密封光阱芯片等关键技术达到了国际领先水平,在实用化研究方面更是走到了国际前列。下一步,建议继续加强工程化研究,加快悬浮光力传感器件向实用化迈进的步伐,同时加大对悬浮光力系统基础研究,探索具有更大颠覆性的新原理与新技术。

参考文献:

- [1] 赵广立. 量子传感:“鼎新带动革故”[N]. 中国科学报, 2022.
- [2] Xu Jing, Tang Chuan, Yang Kuangjunyu. Analysis on the international development strategies and trends of quantum sensing and measurement [J]. *World Sci-Tech R & D*, 2022, 44(1): 46-58. (in Chinese)
- [3] Yang Kuangjunyu, Xu Jing, Tang Chuan. Trend observation: strategic deployment and research hotspots in the field of international quantum sensing and measurement [J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2022, 37(2): 259-263. (in Chinese)
- [4] Ashkin A. Acceleration and trapping of particles by radiation pressure [J]. *Physical Review Letters*, 1970, 24(4): 156-159.
- [5] Ashkin A, Dziedzic J M. Optical levitation by radiation pressure [J]. *Applied Physics Letters*, 1971, 19(8): 283-285.
- [6] Ashkin A, Dziedzic J. Optical levitation in high vacuum [J]. *Applied Physics Letters*, 1976, 28(6): 333-335.
- [7] Ashkin A, Dziedzic J M, Bjorkholm J E, et al. Observation of a single-beam gradient force optical trap for dielectric particles [J]. *Optics Letters*, 1986, 11(5): 288.
- [8] Hu Huizhu, Yin Zhangqi, Li Nan, et al. Inertial sensing disruptive technology based on levitated optomechanics [J]. *Strategic Study of CAE*, 2018, 20(6): 112-116. (in Chinese)
- [9] Chu S, Hollberg L, Bjorkholm J E, et al. Three-dimensional viscous confinement and cooling of atoms by resonance radiation pressure [J]. *Physical Review Letters*, 1985, 55(1): 48-51.
- [10] Lenef A, Rand S C. Electronic structure of the N-V center in diamond: Theory [J]. *Physical Review B*, 1996, 53(20): 13441.
- [11] Li R, Kong F, Zhao P, et al. Nanoscale electrometry based on a magnetic-field-resistant spin sensor [J]. *Physical Review Letters*, 2020, 124(24): 247701.
- [12] Moore D C, Geraci A A. Searching for new physics using optically levitated sensors [J]. *Quantum Science Technology*, 2021, 6(1): 014008.
- [13] Madsen L S, Waleed M, Casacio C A, et al. Ultrafast viscosity measurement with ballistic optical tweezers [J]. *Nature Photonics*, 2021, 15(5): 386-392.
- [14] Gieseler J, Gomez-solano J R, Magazzù A, et al. Optical tweezers—from calibration to applications: a tutorial [J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2021, 13(1): 74-241.
- [15] Monteiro F, Afek G, Carney D, et al. Search for composite dark matter with optically levitated sensors [J]. *Physical Review Letters*, 2020, 125(18): 181102.
- [16] Chan J, Alegre T M, Safavi-naeini A H, et al. Laser cooling of a nanomechanical oscillator into its quantum ground state [J]. *Nature*, 2011, 478(7367): 89-92.
- [17] Kaltenbaek R, Hechenblaikner G, Kiesel N, et al. Macroscopic quantum resonators (MAQRO) testing quantum and gravitational physics with massive mechanical resonators [J]. *Experimental Astronomy*, 2012, 34: 123-164.
- [18] Li T, Kheifets S, Medellin D, et al. Measurement of the instantaneous velocity of a Brownian particle [J]. *Science*, 2010, 328(5986): 1673-1675.
- [19] Delić U, Reisenbauer M, Dare K, et al. Cooling of a levitated nanoparticle to the motional quantum ground state [J]. *Science*, 2020, 367(6480): 892-895.

- [20] 李银妹, 姚焜. 光镊技术[M]. 北京: 科学出版社, 2015.
- [21] Millen J, Monteiro T S, Pettit R, et al. Optomechanics with levitated particles [J]. *Reports on Progress in Physics*, 2020, 83(2): 026401.
- [22] Gieseler J, Deutsch B, Quidant R, et al. Subkelvin parametric feedback cooling of a laser-trapped nanoparticle [J]. *Physical Review Letters*, 2012, 109(10): 103603.
- [23] Vovrosh J, Rashid M, Hempston D, et al. Parametric feedback cooling of levitated optomechanics in a parabolic mirror trap [J]. *Journal of the Optical Society of America B: Optical Physics*, 2017, 34(7): 1421-1428.
- [24] Chen X, Xiao G, Luo H, et al. Dynamics analysis of microsphere in a dual-beam fiber-optic trap with transverse offset [J]. *Optics Express*, 2016, 24(7): 7575-7584.
- [25] Li W, Li N, Shen Y, et al. Dynamic analysis and rotation experiment of an optical-trapped microsphere in air [J]. *Applied Optics*, 2018, 57(4): 823-828.
- [26] 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.
- [27] Zhu X, Li N, Yang J, et al. Revolution of a trapped particle in counter-propagating dual-beam optical tweezers under low pressure [J]. *Optics Express*, 2021, 29(7): 11169-11180.
- [28] Zhu Xunmin. Motion detection and cooling of a large-sized microsphere in dual-beam optical trap in vacuum[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2021. (in Chinese)
- [29] Li Wenqiang. Research on dynamic analysis of trapped microsphere in non-liquid optical tweezers [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2020. (in Chinese)
- [30] Monteiro F, Ghosh S, Fine A G, et al. Optical levitation of 10-ng spheres with nano-g acceleration sensitivity [J]. *Physical Review A*, 2017, 96(6): 063841.
- [31] Moore D C, Rider A D, Gratta G. Search for millicharged particles using optically levitated microspheres [J]. *Physical Review Letters*, 2014, 113(25): 251801.
- [32] Ahn J, Xu Z, Bang J, et al. Ultrasensitive torque detection with an optically levitated nanorotor [J]. *Nature Nanotechnology*, 2020, 15(2): 89-93.
- [33] Millen J, Deesuwana T, Barker P, et al. Nanoscale temperature measurements using non-equilibrium Brownian dynamics of a levitated nanosphere [J]. *Nature Nanotechnology*, 2014, 9(6): 425-429.
- [34] Xiao G, Kuang T, Xiong W, et al. A PZT-assisted single particle loading method for dual-fiber optical trap in air [J]. *Optics & Laser Technology*, 2020, 126: 106115.
- [35] Blaser F, Kiesel N, Deli U, et al. Cavity cooling of an optically levitated submicron particle [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2013, 110(35): 14180-14185.
- [36] Li T. Fundamental Tests of Physics with Optically Trapped Microspheres[M]. Berlin: Springer Science & Business Media, 2012.
- [37] Xiong Wei, Kuang Tengfang, Zeng Weiqing, et al. A repeatable single particle loading technology in the practical light force accelerometer [J]. *Navigation Positioning and Timing*, 2022, 9(2): 160-166. (in Chinese)
- [38] Fu Z, She X, Li N, et al. Launch and capture of a single particle in a pulse-laser-assisted dual-beam fiber-optic trap [J]. *Optics Communications*, 2018, 417: 103-109.
- [39] Tian Yuan, Zheng Yu, Guo Guangcan, et al. Technique and application of vacuum optical tweezers [J]. *Physics Experimentation*, 2021, 41(1): 1-8, 21. (in Chinese)
- [40] 胡慧珠, 傅振海, 葛晓佳, 等. 一种光悬浮式微球的起支方法及装置: 中国, CN105759074 B[P]. 2018-12-25.
- [41] Nieminen T A, Loke V L, Stilgoe A B, et al. Optical tweezers computational toolbox [J]. *Journal of Optics A: Pure Applied Optics*, 2007, 9(8): S196.
- [42] Callegari A, Mijalkov M, Gököz A B, et al. Computational toolbox for optical tweezers in geometrical optics [J]. *Journal of the Optical Society of America B: Optical Physics*, 2015, 32(5): 11-19.
- [43] Taylor M A, Waleed M, Stilgoe A B, et al. Enhanced optical trapping via structured scattering [J]. *Nature Photonics*, 2015, 9(10): 669-673.
- [44] Liu Y, Fan L, Lee Y E, et al. Optimal nanoparticle forces, torques, and illumination fields [J]. *ACS Photonics*, 2018, 6(2): 395-402.
- [45] Jiang Y, Zhu X, Yu W, et al. Propagation characteristics of the modified circular airy beam [J]. *Optics Express*, 2015, 23(23): 29834-29841.
- [46] Liu Z, Wang X, Hang K. Enhancement of trapping efficiency by utilizing a hollow sinh-Gaussian beam [J]. *Scientific Reports*, 2019, 9(1): 10187.
- [47] Kozawa Y, Sato S. Optical trapping of micrometer-sized dielectric particles by cylindrical vector beams [J]. *Optics Express*, 2010, 18(10): 10828-10833.
- [48] Shaltout A M, Shalae V M, Brongersma M L. Spatiotemporal light control with active metasurfaces [J]. *Science*, 2019, 364(6441): 3100.
- [49] Ginis V, Tassin P, Soukoulis C M, et al. Enhancing optical

- gradient forces with metamaterials [J]. *Physical Review Letters*, 2013, 110(5): 057401.
- [50] Scullion M G, Arita Y, Krauss T F, et al. Enhancement of optical forces using slow light in a photonic crystal waveguide [J]. *Optica*, 2015, 2(9): 816-821.
- [51] Zhu B, Ren G, Gao Y, et al. Strong light confinement and gradient force in a hexagonal boron nitride slot waveguide [J]. *Optics Letters*, 2016, 41(21): 4991-4994.
- [52] Cao T, Bao J, Mao L. Switching of giant lateral force on sub-10 nm particle using phase-change nanoantenna [J]. *Advanced Theory and Simulations*, 2018, 1(2): 1700027.
- [53] Qian B, Montiel D, Bregulla A, et al. Harnessing thermal fluctuations for purposeful activities: the manipulation of single micro-swimmers by adaptive photon nudging [J]. *Chemical Science*, 2013, 4(4): 1420-1429.
- [54] Svoboda K, Block S M. Optical trapping of metallic Rayleigh particles [J]. *Optics Letters*, 1994, 19(13): 930-932.
- [55] Phillips D B, Padgett M J, Hanna S, et al. Shape-induced force fields in optical trapping [J]. *Nature Photonics*, 2014, 8(5): 400-405.
- [56] Shan X, Wang F, Wang D, et al. Optical tweezers beyond refractive index mismatch using highly doped upconversion nanoparticles [J]. *Nature Nanotechnology*, 2021, 16(5): 531-537.
- [57] Jannasch A, Demirörs A F, Van Oostrum P D, et al. Nanonewton optical force trap employing anti-reflection coated, high-refractive-index titania microspheres [J]. *Nature Photonics*, 2012, 6(7): 469-473.
- [58] Peng M, Luo H, Xiong W, et al. Enhanced optical trapping of $ZrO_2@TiO_2$ photonic force probe with broadened solvent compatibility [J]. *Optics Express*, 2022, 30(26): 46060-46069.
- [59] Xiong Wei. Preliminary research on theory and experiment of the open-loop light force acceleration sensing based on the dual-beam optical trap[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2019. (in Chinese)
- [60] Gittes F, Schmidt C F. Interference model for back-focal-plane displacement detection in optical tweezers [J]. *Optics Letters*, 1998, 23(1): 7-9.
- [61] Volpe G, Kozyreff G, Petrov D. Backscattering position detection for photonic force microscopy [J]. *Journal of Applied Physics*, 2007, 102(8): 084701.
- [62] Taylor M A, Bowen W P. A computational tool to characterize particle tracking measurements in optical tweezers [J]. *Journal of Optics*, 2013, 15(8): 085701.
- [63] 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.
- [64] Ranjit G, Cunningham M, Casey K, et al. Zeptonewton force sensing with nanospheres in an optical lattice [J]. *Physical Review A*, 2016, 93(5): 053801.
- [65] 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.
- [66] Zhu X, Li N, Yang J, et al. Displacement displacement detection decoupling in counter-propagating dual-beams optical tweezers with large-sized particle [J]. *Sensors (Basel)*, 2020, 20(17): 4916.
- [67] Wang Yingying, He Peitong, Liang Tao, et al. A low-noise quadrant photodetector for levitated optomechanical systems [J]. *Acta Optica Sinica*, 2023, 43(11): 1104001. (in Chinese)
- [68] Li T C, Kheifets S, Raizen M G. Millikelvin cooling of an optically trapped microsphere in vacuum [J]. *Nature Physics*, 2011, 7(7): 527-530.
- [69] 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.
- [70] Chen Z, Kuang T, Han X, et al. Differential displacement measurement of the levitated particle using D-shaped mirrors in the optical tweezers [J]. *Optics Express*, 2022, 30(17): 30791-30798.
- [71] Jensen-mcmullin C, Lee H P, Lyons E R. Demonstration of trapping, motion control, sensing and fluorescence detection of polystyrene beads in a multi-fiber optical trap [J]. *Optics Express*, 2005, 13(7): 2634-2642.
- [72] Chavez I, Huang R, Henderson K, et al. Development of a fast position-sensitive laser beam detector [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2008, 79(10): 105104.
- [73] Ti C, Ho-thanh M T, Wen Q, et al. Objective-lens-free fiber-based position detection with nanometer resolution in a fiber optical trapping system [J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 13168.
- [74] Xiong W, Xiao G, Han X, et al. All-fiber interferometer for displacement and velocity measurement of a levitated particle in fiber-optic traps [J]. *Applied Optics*, 2019, 58(8): 2081-2084.
- [75] Hebestreit E, Frimmer M, Reimann R, et al. Calibration and energy measurement of optically levitated nanoparticle sensors [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2018, 89(3): 033111.
- [76] Zheng Y, Zhou L M, Dong Y, et al. Robust optical-levitation-based metrology of nanoparticle's position and mass [J]. *Physical Review Letters*, 2020, 124(22): 223603.

- [77] Wang Yisong, Hu Shuling, Zhang Yongfeng. Review on frontier research of optical force accelerometer in inertial navigation application [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(11): 1100008. (in Chinese)
- [78] Monteiro F, Li W, Afek G, et al. Force and acceleration sensing with optically levitated nanogram masses at microkelvin temperatures [J]. *Physical Review A*, 2020, 101(5): 053835.
- [79] Lewandowski C W, Knowles T D, Etienne Z B, et al. High-sensitivity accelerometry with a feedback-cooled magnetically levitated microsphere [J]. *Physical Review Applied*, 2021, 15(1): 014050.
- [80] Tebbenjohanns F, Frimmer M, Militaru A, et al. Cold damping of an optically levitated nanoparticle to microkelvin temperatures [J]. *Physical Review Letters*, 2019, 122(22): 223601.
- [81] Conangla G P, Ricci F, Cuairan M T, et al. Optimal feedback cooling of a charged levitated nanoparticle with adaptive control [J]. *Physical Review Letters*, 2019, 122(22): 223602.
- [82] 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.
- [83] Jain V, Tebbenjohanns F, Novotny L. Microkelvin control of an optically levitated nanoparticle [C]//Frontiers in Optics 2016, OSA Technical Digest (online) (Optica Publishing Group, 2016), 2016: FF5B.2.
- [84] Vijayan J, Zhang Z, Piotrowski J, et al. Scalable all-optical cold damping of levitated nanoparticles [J]. *Nature Nanotechnology*, 2023, 18(1): 49-54.
- [85] Aspelmeyer M, Kippenberg T J, Marquardt F. Cavity optomechanics [J]. *Reviews of Modern Physics*, 2014, 86(4): 1391.
- [86] Piotrowski J, Windey D, Vijayan J, et al. Simultaneous ground-state cooling of two mechanical modes of a levitated nanoparticle [J]. *Nature Physics*, 2023, 6: 1-5.
- [87] Kalantarifard F, Elahi P, Makey G, et al. Intracavity optical trapping of microscopic particles in a ring-cavity fiber laser [J]. *Nature Communications*, 2019, 10(1): 2683.
- [88] Xiao G, Kuang T, Luo B, et al. Coupling between axial and radial motions of microscopic particle trapped in the intracavity optical tweezers [J]. *Optics Express*, 2019, 27(25): 36653-36661.
- [89] Kuang T, Xiong W, Luo B, et al. Optical confinement efficiency in the single beam intracavity optical tweezers [J]. *Optics Express*, 2020, 28(24): 35734-35747.
- [90] Kuang T, Liu Z, Xiong W, et al. Dual-beam intracavity optical tweezers with all-optical independent axial and radial self-feedback control schemes [J]. *Optics Express*, 2021, 29(19): 29936-29945.
- [91] Kuang T, Huang R, Xiong W, et al. Nonlinear multi-frequency phonon lasers with active levitated optomechanics [J]. *Nature Physics*, 2023: 1-6.
- [92] Arvanitaki A, Geraci A A. Detecting high-frequency gravitational waves with optically levitated sensors [J]. *Physical Review Letters*, 2013, 110(7): 071105.
- [93] Liang T, Zhu S, He P, et al. Yoctonewton force detection based on optically levitated oscillator [J]. *Fundamental Research*, 2022, 3(1): 57-62.
- [94] Hempston D, Vovrosh J, Toroš M, et al. Force sensing with an optically levitated charged nanoparticle [J]. *Applied Physics Letters*, 2017, 111(13): 133111.
- [95] Liu Huaifeng, Jiao Shimin, Tu Liangcheng. Status and trend of optomechanical accelerometers abroad [J]. *Navigation and Control*, 2021, 20(3): 1-8, 43. (in Chinese)
- [96] Butts D L. Development of a light force accelerometer[D]. US: Massachusetts Institute of Technology, 2008.
- [97] Kotru K. Toward a demonstration of a light force accelerometer[D]. US: Massachusetts Institute of Technology, 2010.
- [98] Pu J, Zeng K, Wu Y, et al. Miniature optical force levitation system [J]. *Chinese Optics Letters*, 2022, 20(1): 013801.
- [99] Zeng K, Pu J, Wu Y, et al. Centrifugal motion of an optically levitated particle [J]. *Optics Letters*, 2021, 46(18): 4635-4638.
- [100] Pu J, Zeng K, Wu Y, et al. A miniature optical force dual-axis accelerometer based on laser diodes and small particles cavities [J]. *Micromachines(Basel)*, 2021, 12(11): 1375.
- [101] Li C, Chou T-W. Mass detection using carbon nanotube-based nanomechanical resonators [J]. *Applied Physics Letters*, 2004, 84(25): 5246-5248.
- [102] Chaste J, Eichler A, Moser J, et al. A nanomechanical mass sensor with yoctogram resolution [J]. *Nature Nanotechnology*, 2012, 7(5): 301-304.
- [103] Blakemore C P, Rider A D, Roy S, et al. Precision mass and density measurement of individual optically levitated microspheres [J]. *Physical Review Applied*, 2019, 12(2): 024037.
- [104] Ricci F, Cuairan M T, Conangla G P, et al. Accurate mass measurement of a levitated nanomechanical resonator for precision force-sensing [J]. *Nano Letters*, 2019, 19(10): 6711-6715.
- [105] Zheng Y, Guo G, Sun F. Cooling of a levitated nanoparticle

- with digital parametric feedback [J]. *Applied Physics Letters*, 2019, 115(10): 101105.
- [106] Zhu S, Fu Z, Gao X, et al. Nanoscale electric field sensing using a levitated nano-resonator with net charge [J]. *Photonics Research*, 2023, 11(2): 279-289.
- [107] Beth R A. Mechanical detection and measurement of the angular momentum of light [J]. *Physical Review*, 1936, 50(2): 115.
- [108] Simpson N B, Dholakia K, Allen L, et al. Mechanical equivalence of spin and orbital angular momentum of light: an optical spanner [J]. *Optics Letters*, 1997, 22(1): 52-54.
- [109] Padgett M, Allen L. The angular momentum of light: optical spanners and the rotational frequency shift [J]. *Optical and Quantum Electronics*, 1999, 31: 1-12.
- [110] Han Xiang, Chen Xinlin, Xiong Wei, et al. Vacuum optical tweezers system and its research progress in precision measurement [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(4): 0401011. (in Chinese)
- [111] Arita Y, Mazilu M, Dholakia K. Laser-induced rotation and cooling of a trapped microgyroscope in vacuum [J]. *Nature Communications*, 2013, 4(1): 2374.
- [112] Reimann R, Doderer M, Hebestreit E, et al. GHz rotation of an optically trapped nanoparticle in vacuum [J]. *Physical Review Letters*, 2018, 121(3): 033602.
- [113] Jin Y, Yan J, Rahman S J, et al. 6 GHz hyperfast rotation of an optically levitated nanoparticle in vacuum [J]. *Photonics Research*, 2021, 9(7): 1344-1350.
- [114] Hoang T M, Ma Y, Ahn J, et al. Torsional optomechanics of a levitated nonspherical nanoparticle [J]. *Physical Review Letters*, 2016, 117(12): 123604.
- [115] Ahn J, Xu Z, Bang J, et al. Optically levitated nanodumbbell torsion balance and GHz nanomechanical rotor [J]. *Physical Review Letters*, 2018, 121(3): 033603.

Research progress in levitated optomechanical sensing technology (*invited*)

Zhang Haoming^{1,2}, Xiong Wei^{1,2}, Han Xiang^{1,2}, Chen Xinlin^{1,2}, Kuang Tengfang^{1,2}, Peng Miao^{1,2}, Yuan Jie^{1,2},
Tan Zhongqi^{1,2}, Xiao Guangzong^{1,2*}, Luo Hui^{1,2}

(1. College of Advanced Interdisciplinary Studies, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;

2. Nanhu Laser Laboratory, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract:

Significance With the rapid development of laser technology in the last century, microscopic optomechanical effects have gradually been discovered by researchers. In 1971, Arthur Ashkin in Bell Laboratory discovered the acceleration and trapping of particles by radiation pressure, and first proposed the concept of "optical potential wells", also known as "optical trap". In 1976, Ashkin achieved optical levitation of a fused quartz sphere in ultrahigh vacuum and pointed out its feasibility of high-precision sensing in low-damping environments. In 1986, Ashkin constructed an optical gradient potential trap using tightly focused beams to capture particles, which announced the birth of optical tweezers and raised a new era of levitated optomechanical sensing technology. Thanks to the pioneering work of Ashkin, and with the development of vacuum technology, levitated optomechanical sensing technology emerged. The technology has great characteristics of non-contact, high sensitivity, and feasible integration. Compared to previous quantum sensing based on the cold atom interference or nuclear magnetic resonance, this new technology involves larger particles with much more uniform atoms, which allows intuitive observation of particle morphology. Meanwhile, levitated optomechanical sensing technology enables ultra-high sensitive detection at room temperature without the need of the complex cryogenic environment. Therefore, the levitated optomechanical system can be considered as an "ideal platform" for precise measurements, where its accuracy is gradually approaching the standard quantum limits. The technology has also played significant roles in many cutting-edge fields including microscopic thermodynamics, dark-matter

explorations, and macroscopic quantum state preparations.

Progress Firstly, we describe the basic theory of the levitated optomechanical sensing. Tested physical quantity can be measured by sensing the motion parameters of the optical-trapped particles. Relevant key sensing technologies contain the loading of the particles, the enhancement of the optical forces, the displacement detections, the calibration of the voltage coefficient and the feedback cooling. These specific technologies are remarkably developed in recent years. For instance, feedback cooling has achieved occupation numbers below 1, which opens the door to quantum ground-state at room temperature. During the last decades, levitated optomechanical sensing is widely used in the measurements of the basic physical quantities, such as the extremely weak forces, the accelerations, the microscopic mass, the residual electrical quantities, and ultra-small torques. We have listed the typical applications of levitated optomechanical sensing. It can realize a force sensitivity of $\sim 10^{-21}$ N/ $\sqrt{\text{Hz}}$ and acceleration sensitivity of ~ 100 ng/ $\sqrt{\text{Hz}}$. It also has achieved microscopic mass resolutions of 10^{-12} gram and an electric intensity sensitivity of $1 \mu\text{V}/(\text{cm}\cdot\sqrt{\text{Hz}})$. When the particles are optically driven to high-speed rotation, accurate torque measurements can be achieved with a sensitivity of $\sim 10^{-29}$ N·m/ $\sqrt{\text{Hz}}$.

Conclusions and Prospects The trends of the technology are summarized and relevant suggestions are given. With the progress of its engineering, levitated optomechanical sensing is moving towards practical applications. The current levitated optomechanical sensing is developed in two routes of high-precision and integration. The former orients towards the demand for basic research, mainly using spatial optical components and pursuing lower noise floors. The latter orients towards practical applications using integrated optics and micro-nano processing. In the next step, we need to pay more attention to effective combination of levitated optomechanical sensing technology and other disciplines, and continue to strengthen the engineering practical research. We hope to achieve technical breakthroughs and practical applications of relevant sensors such as the light force accelerometers and the optomechanical gyroscopes.

Key words: levitated optomechanics; quantum sensing; optical tweezers; precision measurements

Funding projects: National Natural Science Foundation of China (11904405, 61975237)