

仪器与测量

小型冷原子真空气室及微型真空
测量方法研究进展*马哲煜^{1)2)#} 蔡雨^{2)3)#} 秦强²⁾ 唐蕊²⁾⁴⁾ 王翔厅²⁾
陈柏通²⁾ 周锋^{2)†} 詹明生²⁾

1) (中国地质大学 (武汉) 数学与物理学院, 武汉 430071)

2) (中国科学院精密测量科学与技术创新研究院, 武汉 430071)

3) (华中科技大学物理学院, 武汉 430074)

4) (郑州大学电气与信息工程学院, 郑州 450001)

(2026 年 3 月 17 日收到; 2026 年 3 月 17 日收到修改稿)

激光冷却技术是现代原子物理的关键基石之一, 其衍生的冷原子物理在量子频标、量子信息及精密惯性传感等前沿领域展现出日益重要的应用价值, 而推动该技术从实验室走向现场应用的核心路径在于系统的集成化与小型化. 本文综述了近年来小型化冷原子真空系统的研究进展, 重点讨论了真空污染机制、适用于微小型真空腔体的材料选择, 以及反映当前最新水平的设计方案与发展方向. 同时, 针对微小型真空气室真空度测量目前还缺乏有效手段的问题, 系统梳理了微型真空测量若干可行的技术路径. 最后, 总结了微型化冷原子系统迈向实用化仍面临的主要挑战, 并展望其在更广泛领域中的应用前景, 助力高精度量子技术普惠化应用的新阶段.

关键词: 小型化冷原子真空气室, 真空材料, 被动泵浦, 真空测量**DOI:** 10.7498/aps.75.20260382**CSTR:** 32037.14.aps.75.20260382

1 引言

20 世纪 80 年代, 激光冷却与囚禁技术的突破推动了冷原子物理领域的蓬勃发展^[1-6]. 通过激光冷却技术获得的超低温中性原子具备独特的物理优势, 科学家借此在高度可控的量子体系中实现对原子量子态的精准调控, 为基础物理研究开辟了全新维度. 近年来, 激光冷却技术的应用已从传统原子分子光物理领域向精密测量、空间科学、量子信息和基础物理研究等多个方向多维度、体系化发展, 更催生了一系列具有革命性意义的交叉应用.

在精密测量领域, 超低温原子的低运动噪声和高相干性极大提升了原子传感器的灵敏度, 基于冷原子的下一代传感器在惯性力 (加速度和旋转)^[7-9]、重力^[10-12]、磁场^[13,14]、真空^[15,16] 和时间^[17-19] 等多个物理量的测量领域引发计量革命. 在空间科学领域, 激光冷却技术催生的冷原子惯性传感器和量子导航系统正在重塑全球卫星导航系统升级中的核心角色——不依赖卫星信号的自主导航能力^[20-23]. 其中我国科研团队研制的空间光钟载荷放置于空间站梦天实验舱, 精度可达数百亿年误差不到 1 s^[22]; 我国还在空间站上实现了全球首个在轨冷原子陀螺仪, 旋转测量不确定度优于 3.0×10^{-5} rad/s, 标志

* 国家重点研发计划 (批准号: 2025YFF0515200) 资助的课题.

同等贡献作者.

† 通信作者. E-mail: zhoufeng@apm.ac.cn

着空间量子惯性传感时代的开启^[23]. 在量子计算与量子信息处理领域, 冷原子体系兼具长相干时间与高操控自由度的特性、可编程阵列几何结构和良好的可扩展性, 近年来已成为国际上发展最快的量子硬件平台之一^[24-30]. 在基础物理探索领域, 冷原子以其卓越的量子态操控能力和极高的测量精度, 已成为探索基础物理问题的前沿实验平台, 如暗物质和引力波探测、等效原子检验、粒子物理模型模拟等^[31-34]; 激光冷却的范畴也已从气态原子拓展至分子、固态材料^[35,36]; MIT 团队还首次将激光冷却技术与传统引力测量工具结合, 开展引力是否具有量子特性的实验研究^[37]. 总之, 激光冷却技术和冷原子物理系统已经演变成为量子科技时代的基础设施之一, 并持续向更高精度、更好稳定性和鲁棒性以及更广泛应用场景拓展.

经历数十年的发展, 基于冷原子装置的应用已经进入从“实验室里的科学仪器”向“服务于社会的使能技术”转型的关键时期. 目前, 冷原子重力仪、梯度仪等精密测量仪器已在野外环境下开展测试, 应用场景已经拓展至轮船、汽车、飞机和空间站等多种复杂环境, 这对冷原子传感器的工程化水平提出了更高要求^[7,38-40]. 这种更高要求主要体现在两个方面: 一是对系统稳定性与鲁棒性的严格要求, 这就需要提升系统集成度, 减少传统光学器件、光纤及电缆的使用, 构建模块化集成的应用单元; 二是应用场景的客观限制, 如应用于无人机、潜艇、空间站等场景时, 对装置的体积、重量和功耗均有着极为苛刻的要求. 因此, 冷原子系统急需向小型化、集成化、便携式、低能耗方向发展, 实现从实验室仪器到可移动部署的紧凑型量子传感器的转变. 随着光电子集成与微纳制造工艺的不断进步, 以及对全新的系统架构与磁光冷却方案的持续探索, 冷原子物理系统的激光系统、真空系统、磁场系统等各大子系统, 已形成多条面向小型化的技术路线^[41-43]. 这类面向小型化的装置被称为微型磁光阱系统, 目前已实现冷原子真空气室体积从数十升量级向亚升级甚至亚毫升级的突破^[43], 并在诸多场景中投入了实际应用, 比如用于地下勘探、重力测量的微型惯性传感器^[44-47]、可在无人机移动平台部署的微型设备^[48]、微型冷原子微波钟^[49]、紧凑的中性原子量子计算机构架^[29,50]等. 这些技术进展是冷原子技术迈向可部署、多轴冷原子惯性传感器的重要一步, 也为其在航天、移动平台、现场测量等场景

的广泛应用奠定了坚实基础.

目前冷原子物理系统的小型化进程仍存在若干关键技术瓶颈, 其中微小型真空气室内真空水平的维持与精确测量问题尤为突出^[51-53]. 冷原子的冷却与稳定囚禁要求真空气室内部的真空度至少优于 10^{-5} Pa, 这对微小型气室的真空性能及其监测能力提出了极为苛刻的要求. 由于微型腔体的表面积与体积之比显著增大, 导致腔体内壁污染气体的放气量及残余气体密度大幅上升, 而传统泵浦设备在微型化后难以维持与之匹配的抽气效率^[54]. 还有基于光电子集成的小型化方案, 因为光学窗和集成元件难以承受高温烘烤, 所以系统无法实现均匀高效的烘烤除气. 与此同时, 真空气室小型化关键点还有去离子泵, 发展无源无磁的真空气室维持方法. 因为离子泵本身体积不小, 而且带有很强的磁体, 需要加磁屏蔽且远离腔体, 严重限制真空系统的小型化. 在封装过程中, 对真空材料的选择更苛刻, 需选择放气/渗气率低的材料, 发展密封性更好的真空封装技术, 而真空的长时间维持则需要发展非蒸发型吸气剂等无源材料的被动式泵浦方式.

在微小型真空气室的真空度监测方面, 传统的真空测量设备(如电离规、离子泵等)体积庞大, 难以适配微型真空腔体. 此外, 微型电离规在毫米级腔体中面临严重的电子约束失效: 电子在电离区滞留时间极短, 尚未与气体分子发生碰撞即被壁面吸收, 导致灵敏度衰减超过一个数量级, 从而完全丧失对真空气室内部真空度的定量表征能力^[55,56]. 目前适用于微小型腔体的新型超高真空测量技术仍处于发展初期, 普遍存在灵敏度不足、响应速度慢、与微型气室兼容性差等问题, 尚未形成成熟、标准化的解决方案. 系统梳理超高真空测量的现有技术体系, 深入评估其在微型冷原子真空系统中的适用性及优化路径, 对于推动便携式冷原子器件的实际应用具有重要意义. 本文围绕冷原子真空系统小型化这一主线, 对主流超高真空测量方法进行了系统性综述, 重点分析各类技术的测量原理、性能指标及其微型化适配潜力, 以期为下一代集成化冷原子系统的设计与构建提供理论依据和技术参考.

2 小型化冷原子真空气室

冷原子实验的顺利进行高度依赖于超高真空环境的构建. 在标准大气压条件下, 环境中大量处

于高速热运动状态的原子、分子会与磁光阱 (MOT) 中的目标囚禁原子发生频繁碰撞, 引发显著的碰撞加热效应, 该效应将使目标囚禁原子获得摆脱囚禁势阱束缚能力的初始逃逸能量, 导致囚禁效率大幅下降, 严重破坏实验的稳定性与可重复性. 因此, 真空系统的设计与搭建是磁光阱装置研发中的核心环节之一. 真空材料的真空性能 (包括放气特性、气体渗透率等) 直接决定了真空系统的极限真空水平与寿命, 合理选材是真空系统设计的首要环节 [43,57]. 在大气环境中, 活性气体中氢气的真空放气和惰性气体中氦气的渗透是导致真空系统污染、制约极限真空度的关键因素, 是选择真空材料参考的主要性能参数. 对于小型化冷原子真空系统而言, 要求系统放气率低于 $10^{-11} \text{ Pa}\cdot\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{cm}^{-2}$, 氦渗透率低于 $10^{-7} \text{ cm}^2\cdot\text{s}^{-1}$ [43]. 本节将系统阐述真空环境中的各项污染机制, 明确制备冷原子真空系统的材料选型原则, 并针对当前冷原子真空系统小型化发展方向展开详细探讨与分析.

2.1 真空污染来源

2.1.1 氦渗透

任何物质都无法做到绝对地隔绝外界气体分子向其内部渗透与扩散, 因此外部环境中的各种气体分子会不可避免地通过真空腔室的腔壁材料发生渗透与扩散, 最终进入真空内部 [58]. 对于小体积的超高真空系统而言, 气体渗透是制约其极限真空度提升的核心瓶颈 [43]. 完整的气体渗透过程遵循以下步骤: 1) 外部气体分子撞击腔壁表面后, 通过物理吸附或化学吸附作用附着于腔体外表面; 2) 当气体分子的表面焓大于其与腔壁材料的键合力时, 吸附在表面上的气体被电离, 并根据浓度梯度扩散至腔体内部; 3) 扩散至内表面的气体分子发生脱附, 进入真空腔室内部; 4) 部分离子态气体与腔室内其他粒子发生反应后, 以中性分子的形式解吸附至真空环境中. 气体渗透速率取决于渗透气体和腔壁材料的类型. 一般而言, 气体分子动力学直径越小, 渗透率越高; 氢气作为小分子活性气体, 其渗透进入真空腔后可通过泵浦系统排出. 而氦气作为惰性气体, 现有各类真空泵对其泵浦效率均较低, 因此氦气渗透是影响系统极限真空度的关键因素. 针对氦气渗透的有效防治路径主要包括两方面: 一是合理的真空材料选择, 尽可能选用低氦渗透率材料;

二是优化真空结构设计, 减少焊缝数量与焊缝长度, 采用激光焊接、阳极键合、金属密封等先进密封技术. 部分常用真空材料的氦渗透数据在表 1 中列出.

2.1.2 材料放气

材料放气特指真空系统材料表面吸附态气体或内部溶解态气体, 通过解吸附、解溶作用释放后, 扩散至真空环境中形成污染的过程 [83]. 与前文所述的气体渗透过程存在本质区别: 放气的污染来源是材料自身无法彻底清除的固有杂质 (如加工制造阶段残留的水汽、碳氢化合物, 或长期储存过程中吸附的环境气体), 而渗透是外部环境气体透过材料本体扩散至真空内部. 在超高真空环境中, 放气是最主要、最持久的污染气体来源, 其形成机制复杂 (主要包括蒸发、解吸附、扩散、渗透等), 因此也最难估算与控制 [57]. 针对真空放气的控制, 核心技术路径包括两方面: 一是源头控制, 优先选用放气速率低的真空材料 (如不锈钢、钛、石英玻璃等); 二是需要在系统进行真空预抽前, 对所有真空元件进行超声清洗 (去除表面附着的油污、颗粒及吸附态杂质) 与烘烤除气 (通常在 100°C — 400°C 的温度区间下保温数小时至数十小时, 加速材料内部气体的解吸附与扩散释放), 可显著降低系统的残余放气率. 部分常用真空材料的典型放气速率数据在表 1 中列出, 部分材料在不同烘烤温度、表面处理工艺以及测试条件下, 热膨胀系数和真空放气率存在差别, 因此特别标注处理及测试条件, 未标注即为未经特别处理并处于室温条件下的参数.

2.1.3 泄漏

泄漏问题是真空系统制造与运行过程中的主要故障模式之一, 它不仅直接影响系统的极限真空水平, 还会缩短真空系统的稳定运行寿命. 一个理想的真空系统应不存在泄漏现象, 但实际上, 当真空系统完成封装后, 会不可避免地存在真实泄漏与虚拟泄漏两种情况 [57,84]. 真实泄漏指的是真空腔壁本体缺陷或各连接件之间的密封失效, 或装配间隙形成的物理通道, 导致外部环境中的污染气体通过该通道进入系统内部的过程; 虚拟泄漏指的是腔体内部存在部分气体堆积在空间死角, 在初始真空预抽阶段未被完全排出, 后续随着时间推移逐步扩散至真空腔内部, 进而引发真空变差的“伪泄漏现象”.

表 1 各常用真空材料的热膨胀系数、真空放气率、氦渗透率

Table 1. Thermal expansion coefficients, outgassing rates, and helium permeabilities of commonly used vacuum materials.

材料名称	热膨胀系数/ K^{-1}	真空放气率/ $(\text{Pa}\cdot\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{cm}^{-2})$	氦渗透率
316L不锈钢(500 °C烘烤)	$(17.8\text{—}19.3) \times 10^{-9}$ [59]	4.09×10^{-14} [60]	金属通常无氦渗透[61]
316L不锈钢(950 °C烘烤)	19.3×10^{-9} [59]	6.15×10^{-15} [60]	无氦渗透
304不锈钢(500 °C烘烤)	19.3×10^{-9} [62]	1.19×10^{-13} [60]	无氦渗透
304不锈钢(950 °C烘烤)	19.2×10^{-9} [62]	2.75×10^{-15} [60]	无氦渗透
钛	8.35×10^{-6} [63]	2.5×10^{-15} [64]	无氦渗透
铝	23×10^{-6} [63]	3.9×10^{-15} (20 h 100 °C)[57]	无氦渗透
铜	16.5×10^{-6} [63]	1.8×10^{-9} [57]	无氦渗透
无氧铜	17.7×10^{-6} [65]	3.06×10^{-12} (72 h 150 °C)[66]	无氦渗透
氧化铝	7.6×10^{-6} [67]	4.2×10^{-14} (24 h 200 °C)[68]	$10^{-10}\text{—}10^{-12} \text{ cm}^2\cdot\text{s}^{-1}$ (70 °C)[69]
AlSi10 Mg	23×10^{-6} [67]	3.6×10^{-12} [70]	—
蓝宝石	$(5.0\text{—}9.0) \times 10^{-6}$ [71]	1.33×10^{-13} [72]	—
Pyrex耐热玻璃	3.3×10^{-6} [73]	10^{-11} (10 h 250 °C)[43]	$3 \times 10^{-10} \text{ cm}^2\cdot\text{s}^{-1}$ [74]
K9光学玻璃	8.6×10^{-6} [75]	—	—
BK7	$7\text{—}8 \times 10^{-6}$ [76]	—	—
铝硅酸盐玻璃	$(4.4\text{—}4.9) \times 10^{-6}$ [77]	10^{-17} (10 h 250 °C)[43]	$6.8 \times 10^{-16} \text{ cm}^2\cdot\text{s}^{-1}$ [43]
尖晶石	$7.6\text{—}8.9 \times 10^{-6}$ [78]	—	—
Si	$(2.57\text{—}4.33) \times 10^{-6}$ [79]	10^{-25} (10 h 250 °C)[43]	$3.2 \times 10^{-34} \text{ cm}^2\cdot\text{s}^{-1}$ [43]
石英(SiO_2)	0.6×10^{-6} [80]	10^{-14} [81]	$10^{-9} \text{ cm}^2\cdot\text{s}^{-1}$ [82]

预防泄漏的核心技术手段包括两个方面：一是采用先进的精密密封技术（如金属密封圈密封、激光焊接等），以确保密封界面的可靠性；二是优化真空结构设计，减少腔体死角与装配间隙，从结构层面规避泄漏通道的形成。与泄漏预防相比，泄漏发生后的精密探测更为关键。目前真空行业中，氦质谱检漏技术是泄漏检测的主流方法，但氦泄漏探测器与氦气自身成本较高，且检测流程相对复杂，制约了其在部分低成本应用场景中的推广。为了提升泄漏检测效率和灵敏度，能快速识别早期的微小泄漏，真空行业近年来开始探寻基于数据驱动异常检测方法。该方法通过采集真空系统泵浦过程中的真空度变化曲线、泵组运行参数等基础数据，利用机器学习、统计分析等算法构建真空状态监测模型，实现对系统泄漏异常的实时识别，检漏准确率目前可达 97%，且具备早期微小泄漏（泄漏率小于 $10^{-10} \text{ Pa}\cdot\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ ）的探测能力，为真空系统的高效检漏提供了新的技术路径 [85]。

2.1.4 逆流/迁移

真空系统中的逆流或迁移现象指的是已经通过泵浦系统排出腔内的物质，通过特定机制重新返

回腔室内部，进而引发真空污染的过程。例如，被离子泵吸附的气体解离解吸附后返回腔内，从而形成真空污染。这种污染现象通常不会对真空环境造成显著破坏，且该类污染的防治技术成熟且操作简便。核心防治思路为构建物理阻隔或单向导通机制，阻断逆流物质的传输路径，如增加挡板或防回流阀门等装置就能有效防治 [86]。

2.2 真空材料

在前文所述的各类真空污染源头中，已知真空放气与氦渗透是污染的主要来源，它们决定了真空系统最终稳定的极限真空水平以及系统稳定维持良好真空的性能优劣。表 1 中提及的不锈钢、钛、铝、铜等金属，因机械强度、可加工性及低真空放气率等方面的优异性能，常用于制造真空腔体；而制作冷原子真空系统腔体需预留透明窗口用以激光透过，腔体材料与窗口材料的选择搭配核心考量材料自身真空性能的优越性，以及两者的热膨胀系数匹配性（避免真空烘烤过程中因热应力差异导致密封失效或结构不可逆损伤）和封装工艺适配性。

从表 1 可以得出，钛（金属中放气、氦渗透性能最优）与蓝宝石（透明材料中氦渗透性能最优，

无氦渗透记录) 热膨胀系数接近, 是超高真空系统的优选组合; 硅酸盐玻璃、陶瓷玻璃 (放气速率较低, 氦渗透略逊于蓝宝石) 分别适配纯硅、氧化铝陶瓷 (热膨胀系数匹配), 并且硅与含足量 Na 的硅酸盐玻璃满足阳极键合需求, 适用于需要高精度密封的场景; 铝硅酸盐玻璃氦渗透率略优于硼硅酸盐玻璃, 硅腔体-铝硅酸盐玻璃组合能实现稳定的超高真空. 上述真空性能优异的材料在微型冷原子真空系统制备中得到了广泛应用, 具体的结构设计方案、封装工艺细节及真空性能测试结果将在 2.3 节中详细讨论.

2.3 小型化真空封装

传统冷原子系统的真空腔体与光学组件通常体积庞大、系统鲁棒性不足、环境适应性差. 以目前典型冷原子重力仪为例 [87], 总体积约达 600 L (真空腔室约 120 L), 总重量约 180 公斤, 为抑制地面振动与环境磁场干扰, 还配备三维隔振平台与磁

屏蔽装置, 系统工作时功耗高达 400 W; Tell^[88] 为了追求极致的灵敏度所研制的设施级冷原子干涉仪, 设计长达 10.5 m 的真空落管以延长自由落体时间, 标配隔振、恒温、磁屏蔽等系统减小环境干扰影响, 其体积占据整栋实验楼的垂直空间. 可以看到, 传统冷原子系统中庞大的真空系统是制约其小型化的关键因素, 极大地限制了冷原子传感器在移动平台上的应用. 近年来发展了多种的微型化技术方案, 这些方案中真空架构极其紧凑, 在系统中集成了大量光学或电学元件, 整体体积缩减至仅升级、亚升级. 比如: 1) 基于金属三维 (3D) 打印技术的全新腔体制造工艺^[67,70] 实现了传统加工无法完成的复杂内部几何结构, 极大优化了光路和气流, 同时实现了轻量化、快速原型制备与降低成本, 如图 1(a); 2) 微型泵浦装置: 开发一种无磁场、基于场发射原理的静电离子泵^[89], 该类微型泵浦设备具备低功耗、体积小、兼容碱金属蒸气的优势, 为微型冷原子传感器的实用化提供了关键支撑,

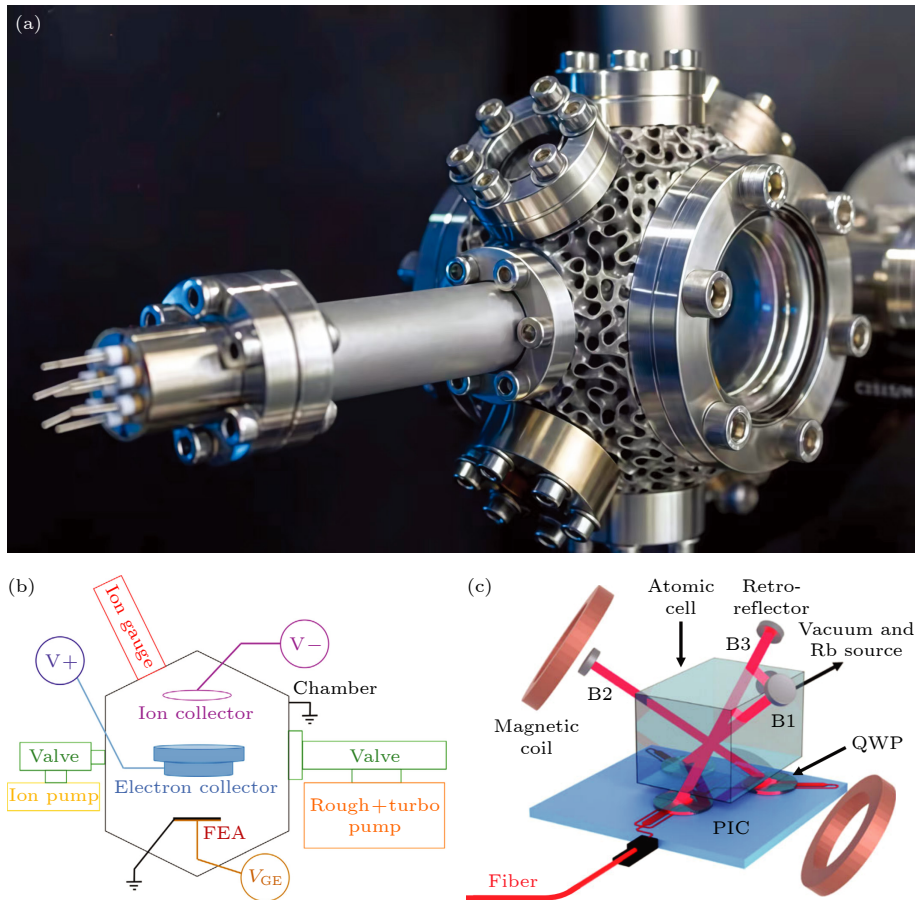


图 1 (a) 配备标准真空组件的增材制造真空腔室^[70]; (b) 无磁离子泵装置的概念示意图^[89]; (c) 一体化芯片集成磁光阱示意图^[90]

Fig. 1. (a) Additively manufactured vacuum chamber equipped with standard vacuum components^[70]; (b) conceptual schematic of a non-magnetic ion pump device^[89]; (c) schematic diagram of an integrated chip-based magneto-optical trap^[90].

如图 1(b); 3) 一体化与芯片级集成工艺, 通过将微型光学元件 (如透镜、反射镜、波片、分束器等) 与原子囚禁结构集成, 形成混合原子芯片. 如图 1(c) 所示, 该技术方案可将激光光路压缩至毫米甚至微米尺度, 并可内置在真空腔体内, 从而实现前所未有的紧凑性^[90]. 以上技术路线各具优势, 但共同指向一个未来: 冷原子系统将不再是仅供研究的精密仪器, 而是可以嵌入各类移动平台、适应现场复杂环境的核心传感器件, 为量子技术的产业化应用开辟广阔空间.

接下来, 本文将对部分已得到实验验证的前沿技术方案进行具体介绍. 如图 2(a) 所示, Little 等^[91]设计实现的可被动泵浦维持 MOT 超过 200 天的小型化冷原子系统, 由钛腔体和六片蓝宝石窗片 (连接方式激光焊接) 组成被动泵浦式微小型真空腔室, 腔体体积仅 70 mL. 腔体框架四周通过激光焊接四根角管, 其中两根内置非蒸散型吸气剂用于被动维持真空, 一根集成铷分配器, 另一根为铜制真空连接管, 用于实验初期与离子泵组的连接. 系统真空性能表现优异: 主动泵浦时经离子泵示数可得系统真空度可达 10^{-11} mbar ($1 \text{ mbar} = 100 \text{ Pa}$), 完成预抽与实验测试后, 通过冷焊技术密封铜制连接管, 使实验腔与泵组完全隔离; 仅用吸气剂的被动泵浦状态下, 利用囚禁冷原子的装载曲线评估真空度长期稳定优于 10^{-7} mbar, 成功实现 MOT 的稳定维持超过 200 天, 验证了被动泵浦方案在长周

期运行中的可靠性. 如图 2(b) 所示, Burrow 等^[92]设计的独立陶瓷真空腔, 氧化铝陶瓷腔体-陶瓷玻璃窗片制造的独立立方真空腔室 (边长 32 mm, 体积约 25 cm^3), 重量仅为 252 g, 经离子泵示数可得系统主动泵浦时真空可达 10^{-7} mbar, 被动泵浦 17 天后, 采用本文后述的冷原子法测得的真空水平长期优于 10^{-6} mbar, 另一测试腔体在无铷释放、无主动泵的情况下, 保持类似真空度超过了 500 天. 腔体内部集成了衍射光栅芯片, 仅需单光束实现激光冷却 (grating-MOT, gMOT). 氧化铝陶瓷材料的选择减少了真空放气与氦气渗透, 预计氦气渗透限制下的真空寿命可达数年. 该装置的原子俘获率约 10^6 个/s, 原子冷却温度约 $3 \mu\text{K}$, 满足多数精密测量实验的需求. 系统总功耗仅 10 W, 由 USB 电池供电可持续工作数小时.

McGilligan 等^[93]设计了基于 MEMS (micro-electro-mechanical systems, MEMS) 原子气室的微小型冷原子系统, 如图 3(a) 所示. 真空气室由硅腔体和铝硅酸盐玻璃 (aluminosilicate glass, ASG) 窗片封装成 MEMS 微腔, 腔体尺寸 $40 \text{ mm} \times 20 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$, 通过阳极键合技术密封, 氦渗透性能表现良好, 极限真空 10^{-9} mbar, 理论上无主动泵可维持 6 个月. 通过高功率激光在 ASG 表面加工了一个真空端口, 端口上同样利用阳极键合技术, 延伸出一根 ASG 真空连接管, 将腔体连接到离子泵, 两者之间用硅垫圈密封. 该 MEMS 微腔

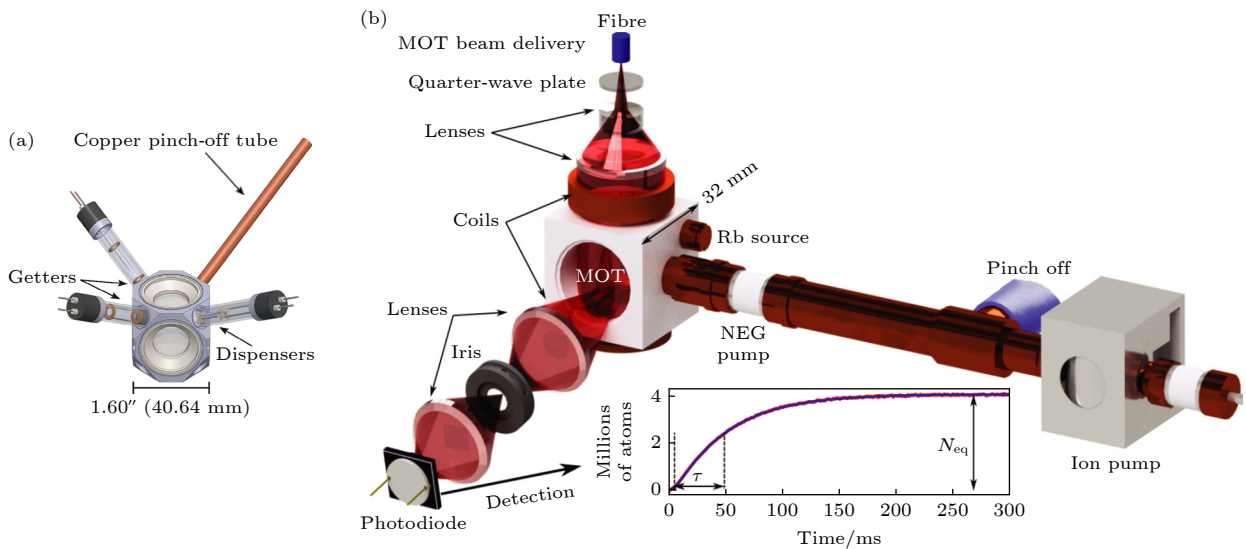


图 2 (a) 钛合金框架-蓝宝石窗口组成的可被动泵浦的小型化真空腔体^[91]; (b) 氧化铝陶瓷腔体-陶瓷玻璃窗片制造的独立真空腔室^[92]
Fig. 2. (a) Miniaturized passively pumpable vacuum chamber consisting of a titanium alloy frame and a sapphire window^[91]; (b) stand-alone vacuum chamber fabricated from an alumina ceramic body and a ceramic glass window^[92].

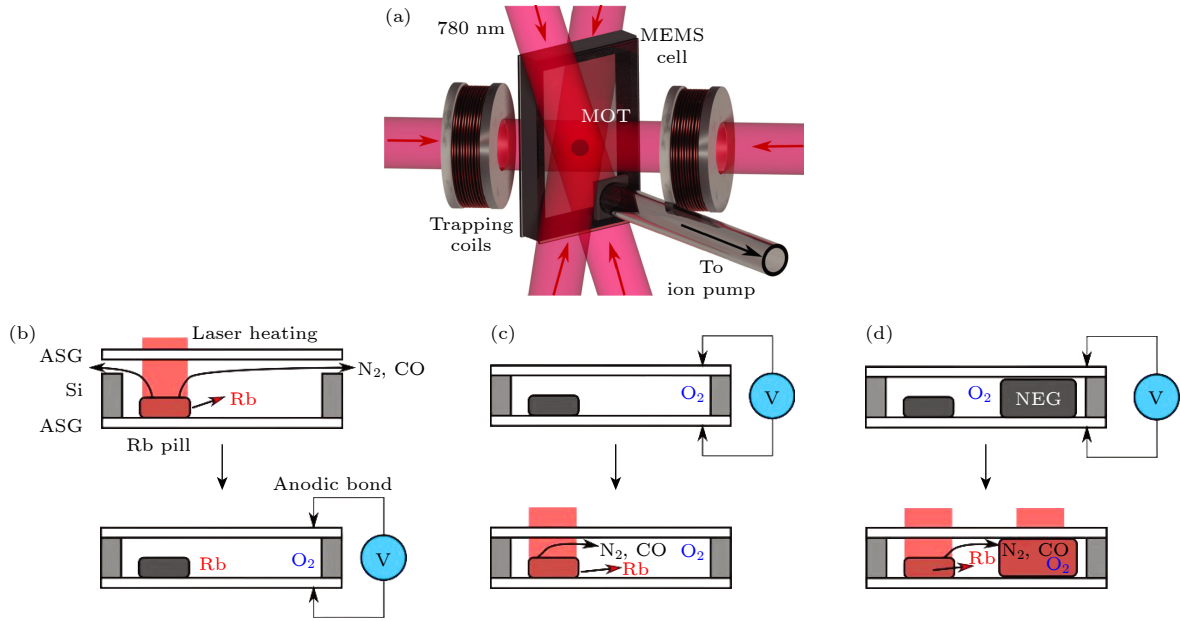


图3 (a) 硅腔体-铝硅酸盐玻璃窗片组成的 MEMS 真空微腔^[93]; (b)–(d) 三种不同的 MEMS 微腔封装工艺, 其中 (b) 激光激活铷分配器后密封; (c) 先密封后激活铷分配器; (d) 非蒸发吸附剂 (NEG) 与铷分配器组合^[41]

Fig. 3. (a) MEMS vacuum micro-cavity composed of a silicon cavity and an aluminosilicate glass window^[93]. (b)–(d) Three different MEMS micro-cavity packaging processes: (b) sealing after laser activation of the rubidium dispenser; (c) activation of the rubidium dispenser after sealing; (d) combination of a non-evaporable getter (NEG) with a rubidium dispenser^[41].

系统为了更加微型化, 腔体选择了硅而非金属, 导致其极限真空水平会有所降低, 但基本满足基本的冷原子实验需求, 而且这种结构更加适配于光栅芯片与磁场芯片的安装, 两侧透明玻璃窗片也大大优化了通光性. 图 3(b)–图 3(d) 展示了三种不同的 MEMS 微型真空封装工艺^[41], 图 3(b) 在腔体密封之前, 使用激光激活铷分配器, 然后利用外部真空与 MEMS 微腔腔壁之间的温度梯度, 将非铷污染物 (如 N_2 , CO) 排出真空腔, 同时将金属铷冷凝在真空腔内, 最后通过阳极键合工艺将真空腔密封, 但过程中会引入少量 O_2 污染物; 图 3(c) 通过阳极键合工艺将腔体密封后, 再使用激光激活铷分配器, 因为腔体已经密封, 激活过程产生的非铷元素和 O_2 无法排出真空腔; 图 3(d) 在腔体密封之前, 将 NEG 和铷分配器沉积到腔内, 密封后, 使用激光同时激活铷分配器和 NEG, 而非铷元素和 O_2 (来自阳极键合过程) 会在 NEG 表面形成稳定的化学化合物, 最终真空腔内仅留下纯铷蒸气.

上述三种小型化真空腔封装工艺的核心设计原则除小体积封装外, 还同时试图摒弃有源泵组, 解除真空系统对大体积且带强磁体的离子泵的限制, 实现以非蒸散型吸气剂为主的无源被动式泵浦技术. 通过优化真空材料选择与封装工艺, 克服了

小型化后是否能维持良好真空的挑战. 相比传统带离子泵的真空装置 (真空度达到 10^{-11} mbar), 这三种工艺实现的被动式小型真空气室的真空度水平目前均在 10^{-6} – 10^{-7} mbar. 虽然相较于主动泵浦, 目前其极限真空水平有所下降, 但其优势在于通过在腔体内内置非蒸散型吸气剂实现被动式真空维持, 大幅简化了系统结构, 有效降低了整体功耗与体积, 并且方便转移与部署. 然而, 此类技术方案也带来了新的技术挑战: 有源泵组 (如离子泵) 不仅用于维持真空, 还是用于监测真空气室内部真空度的有效手段. 对于去除离子泵等有源泵组小型化真空气室, 需开发新型真空测量技术, 以实时监测真空状态并及时调控, 确保真空水平维持在实验所需的区间内.

3 微型真空测量方法

微型真空气室 (如 MEMS 真空封装腔体、微型离子泵腔室等) 首先因体积小、高表面积与体积比会加剧真空放气现象. 同时, 传统真空监测设备体积庞大, 难以与微型真空气室匹配, 并且如电离计、离子泵等设备易引入振动与磁场干扰, 这使得微型真空气室内真空水平的精准监测成为当前微

型真空技术发展面临的严峻挑战. 目前缺乏精准可靠、微型化且不影响腔内真空状态的真空度测量手段, 制约了微型惯性传感器、量子传感等相关器件的实际应用及长期可靠性提升. 针对该问题, 下文将系统梳理适用于微型真空气室的各类新型真空测量技术路径, 分析各自的潜在优势、技术瓶颈及发展前景, 为微小型真空技术的深入研究和未来发展提供参考.

3.1 基于冷原子的真空度测量

真空度会影响到磁光阱中冷原子的寿命, 反过来, 通过冷原子数目的变化, 就能反推出背景真空水平^[94,95], 诸如美国国家标准局等机构已经长期研究两者之间的联系, 以期建立全新的真空标准——冷原子真空标准^[96]. 首先, 冷原子 (以铷原子为例) 数目 $N(t)$ 随时间的变化 (即磁光阱装载动力学方程) 满足以下方程^[97,98]:

$$\frac{d}{dt}N(t) = \alpha P_{\text{Rb}} - (\beta P_{\text{Rb}} + \gamma P_{\text{bk}} + \Gamma_0) N(t), \quad (1)$$

其中 P_{Rb} 和 P_{bk} 分别为铷蒸气压和环境分压; 常数 α 与实验设备与参数有关; $\beta = 3.3 \times 10^7 \text{ mbar}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $\gamma = 3.7 \times 10^7 \text{ mbar}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 分别是两体碰撞损失系数与背景碰撞损失系数^[97]; Γ_0 是与冷原子碰撞有关的因子, 也可近似认为是一个常数. (1) 式给出冷原子数目的一个指数形式的解:

$$N = N_0(1 - e^{-t/\tau}), \quad (2)$$

其中 $N_0 = \alpha P_{\text{Rb}}\tau$, 即平衡时的冷原子数目^[92], $\tau^{-1} = (\beta P_{\text{Rb}} + \gamma P_{\text{bk}} + \Gamma_0)$. N_0 和 τ 可以通过采集 MOT 装载曲线并拟合得出, 装载曲线的拟合如图 4 所

示. τ 能用于估算环境压强大小^[97]:

$$P_{\text{vacuum}} < \frac{2 \times 10^{-8} \text{ Torr} \cdot \text{s}}{\tau}, \quad (3)$$

这给出了背景真空水平一个很好的下限估计.

基于冷原子的真空测量方法测量精度高, 测量范围广, 对未知混合气体的测量偏差较小, 在激光冷却实验中仅需囚禁装置自身就可以完成真空测量, 不需要额外的组件, 具备成为主要真空标准的潜力. 同时已有便携式冷原子真空标准演示^[54], 符合实现小型化应用的发展趋势. 但对冷原子碰撞损失系数的理论预测仍存在偏差, 限制了其在极高真空水平下的测量准确度, 且该方法依赖于 MOT 的实现, 在未成功实现原子囚禁前, 缺乏对系统真空的有效原位检测手段. 未来主要的发展趋势一是进一步理解低真空水平下的粒子损失机制, 扩展其测量范围; 二是完善更多常见背景气体碰撞损失率系数数据库, 提升其测量精度.

3.2 基于囚禁微粒的真空度测量

通过光学悬浮纳米振荡器可以将微粒囚禁于光阱中, 通过微粒与背景气体的碰撞可以反映此处的局部背景真空水平, 如图 5 所示^[99,100]. 被困粒子与空气分子之间的碰撞会导致退相干. 受量子光学中光强的二阶相干性分析的启发, 利用能量位移功率谱密度 (second-order spectral power density, sdPSD) 进行分析, 它可以分辨出退相干微粒振动频率的不同组成部分^[99]. sdPSD 满足下列等式:

$$S_{x^2x^2}(\omega) = \frac{4\Gamma_0(k_B T)^2}{m^2\omega_0^2} \frac{4\Gamma_0^2 + \omega^2 + 4\omega_0^2}{(\omega^2 + \Gamma_0^2)[4\omega^2\Gamma_0^2 + (\omega^2 - 4\omega_0^2)^2]}, \quad (4)$$

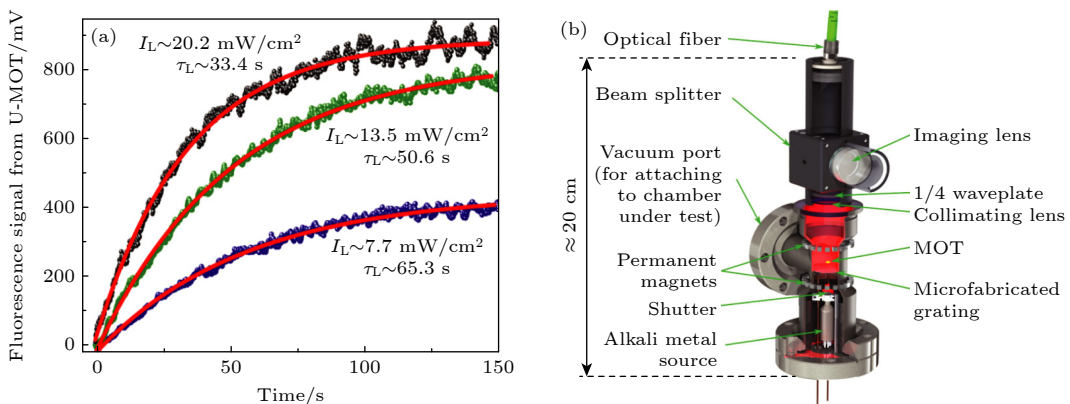
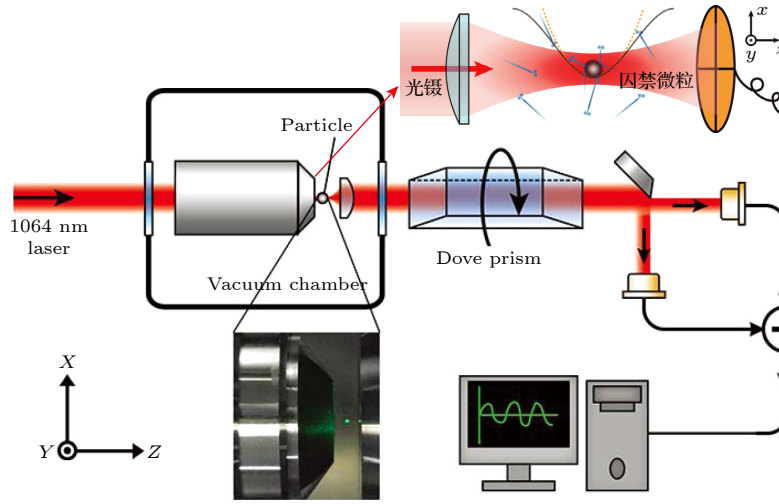


图 4 (a) 典型磁光阱装载曲线及真空度估计^[95]; (b) 便携式冷原子真空传感器的实物示意图^[54]

Fig. 4. (a) Typical magneto-optical trap loading curves and vacuum estimation^[95]; (b) schematic diagram of the portable cold atom vacuum sensor^[54].

图 5 基于囚禁微粒的真空测量原理图^[99]及装置示意图^[100]Fig. 5. Schematic diagram of vacuum measurement based on levitated particles^[99] and its experimental setup^[100].

其中 Γ_0 为与周围分子碰撞而引入的阻尼率, ω_0 为特征频率, m 和 T 为捕获粒子的质量和温度, k_B 为玻尔兹曼常数. sdPSD 在 $\omega = 0$ 附近存在一个峰值, 它能保持不受非线性因素的影响, 是用来得到 Γ_0 值的不错选择. 强调 Γ_0 的原因在于, 纳米颗粒的阻尼率与环境分压之间存在确定性关系^[101], 因此 Γ_0 可用于测量真空度:

$$\Gamma_0 = \frac{6\pi\eta R}{m} \frac{0.619}{0.619 + Kn} (1 + c_K), \quad (5)$$

式中 $c_K = 0.31Kn/(0.785 + 1.152Kn + Kn^2)$; R 是纳米颗粒的半径; η 为环境气体的黏度系数; m 是气体分子的质量; $Kn = \lambda/R = k_B T / \sqrt{2}\pi d^2 P$ 为努森数, 其中 λ 为环境气体分子的平均自由程, P 为环境分压, T 为气体的温度, d 为气体分子的碰撞直径. 由于很难准确地确定一个纳米颗粒的质量和直径, 它们的数值可以通过对多组数据分析来拟合得到. 这样通过 (5) 式, 代入得到的 Γ_0 等值就可得到环境的真空度.

由于光阱中微粒装载过程通常是气溶胶随机捕获, 通过超声雾化将纳米颗粒送入光阱区域, 再依靠光阱概率性捕获实现囚禁. 这种方式将导致真空腔内瞬时真空度急剧上升, 需等待真空恢复或重新抽真空到目标真空度区间, 再进入测量阶段, 这也制约了该测量方法的极限真空度和应用场景. 近年来发展的一种更洁净、低污染、真空兼容的装载方案——激光诱导声波解吸技术^[102,103], 可能为这一问题带来解决思路. 在真空环境中利用激光在基底背面激发声波, 把表面粒子“震”下来, 没有溶

剂引入化学污染, 并且整个过程可以直接在低于 10^{-6} mbar 的真空环境中进行, 微粒受到冲击被弹射至真空中, 单次激发后微粒的成功装载率可高达 80%. 同时为了进一步减小引入微粒对真空环境的干扰, 可以预先对微粒进行高温预处理, 减少微粒表面或内部杂质脱附引起的真空放气污染^[104].

光学悬浮系统本身结构紧凑, 可将产生光镊的物镜等光学元件放置在真空气室外部, 因而适用于微小型真空气室, 并具备高灵敏度、宽动态范围与良好的鲁棒性, 所测真空度直接对应背景气体分子碰撞的机械效应, 有望成为其他真空计的校准参考标准. 但其测量下限存在原理性掣肘, 在极高真空下, 激光加热将成为更主要的能量耗散源, 导致基于 sdPSD 的测量失准; 并且在极高真空水平环境中, 若缺乏外部反馈控制, 悬浮纳米颗粒易因稳定性不足而丢失^[99]; 同时真空水平越低, sdPSD 的零频峰越窄, 想要获得高分辨率的光谱信号以满足所需测量精度, 需要更长的测量时间.

3.3 基于光学薄膜的真空度测量

光机械传感器可以利用光学频率计量和光谱学的工具来实现高精度测量, 其中基于机械阻尼和偏转的光机械传感器在真空测量中有不错表现. 机械振荡器在气体环境中会受到与真空度相关的阻尼, 阻尼率随真空度由低到高的变化分为三个区域: 固有阻尼区、分子流主导区和黏性流主导区. 在固有阻尼区, 基本没分压, 总的机械阻尼率大致等于固有阻尼率 Γ_0 , 它由机械振子本身决定; 而在

黏性流主导区, 分压特别大, 由于监测的是真空水平, 这种情况暂不考虑. 我们主要考虑分子流主导区的情况. 在分子流主导区, 压强比固有阻尼区高, 气体引起的阻尼率与真空度呈线性关系, 对于一个薄膜机械振子 (如图 6) 而言^[105,106]:

$$\Gamma_m = \frac{(1 + \pi/4)\alpha + 2(1 - \alpha)}{\rho h} \sqrt{\frac{8m_g}{\pi k_B T}} P, \quad (6)$$

其中 ρ 和 h 分别为薄膜的密度和厚度, m_g 是环境气体分子的质量, P 为气体分压, T 是气体和振子的温度, α 是一个与薄膜表面相关的系数. 在分子流主导区, 利用波动耗散定理, 由气体颗粒碰撞的力噪声功率谱密度可以计算得到阻尼率 Γ_m ^[105,106], 进而可以推导出气体分压. 已有研究团队开展了基于氮化硅 (SiN) 和碳化硅 (SiC) 的光机械传感器在真空测量中的性能研究, 实验结果表明, 该类光机械传感器在分子流主导区内的真空测量精度可以达到 1.1% 的读数不确定性^[107], 与高性能的传统真空计相当. 实验显示的阿伦方差兼容优于 1% 的精度, 且基线漂移显著低于次级标准, 充分验证了该光机械传感器的测量准确性和长期稳定性. 此外, 该类传感器无需通过压力标准进行校准, 即可在量化不确定度内实现准确测量. 光学薄膜尺寸一般在微米级, 便于集成封装在真空腔室内部, 通过光纤或外部光源实现光学测量读取真空度, 具有集成化优势. 但该方法仍存在一定局限性, 如在对轻气体

测量时, 因轻气体动量适应系数的不确定, 其测量不确定度将被限制在约 12%; 同时测量性能还受到振子材料密度不确定度的影响, 对于非单晶材料, 其密度的表征不确定性会进一步增大总测量不确定度^[107]. 目前, 该领域的主要发展方向为改进材料表征技术, 降低氮化硅等薄膜材料的密度不确定性以提升测量精度. 同时, 通过延长测量时长, 进一步扩展光机械传感器的有效测量范围.

3.4 基于光纤微腔的真空度测量

传统的真空传感器通常依赖于电学读出系统, 但这些系统存在寄生电容和热机械噪声等问题, 于是有研究团队开发了一种由悬浮的金/石墨烯膜和空心光纤组成的密封法布里-珀罗腔真空测量传感器^[108], 原理如图 7 所示. 与传统的纳米机械真空传感器不同, 该传感器是通过光学读出系统监测真空水平变化引起的谐振频率变化, 从而实现超高灵敏度的真空检测.

当薄膜拉伸时, 施加在薄膜上的气压差 ΔP 满足如下方程^[109]:

$$\Delta P \pi R^2 = \sigma 2\pi R t, \quad (7)$$

其中 R 是薄膜弯曲后的曲率半径, 假设薄膜圆心偏离原平衡位置的距离 x 足够小, 则 $R \approx r^2/2x$; σ 为双轴径向应力, t 和 r 分别为圆形薄膜的厚度和半径, 则 $\sigma = \Delta P r^2/4tx$. 除此之外, 气压差还可

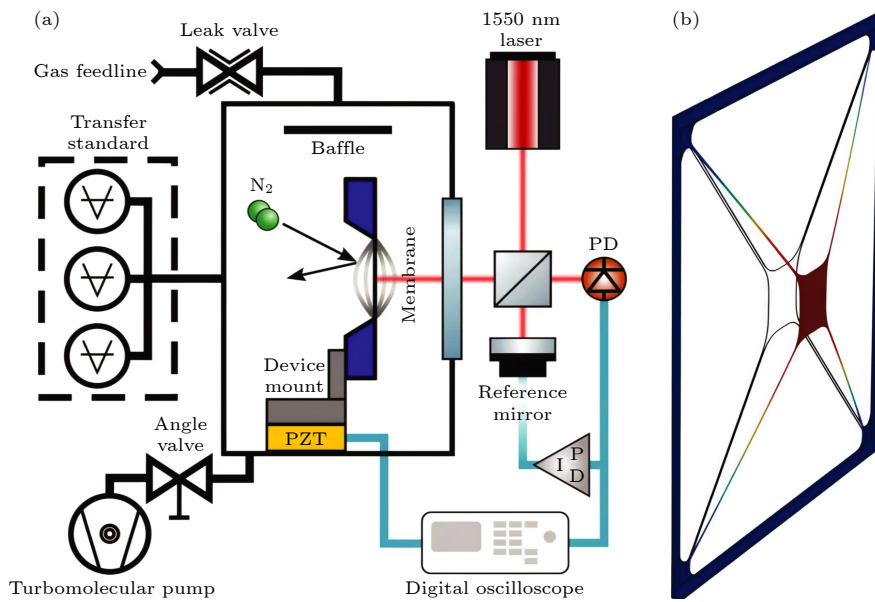


图 6 (a) 基于光学薄膜的真空测量实验装置示意图; (b) “蹦床”型光学薄膜的结构示意图^[107]

Fig. 6. (a) Schematic diagram of the experimental setup for vacuum measurement based on optomechanical pressure sensor; (b) simulation of the fundamental mode of an optomechanical trampoline^[107].

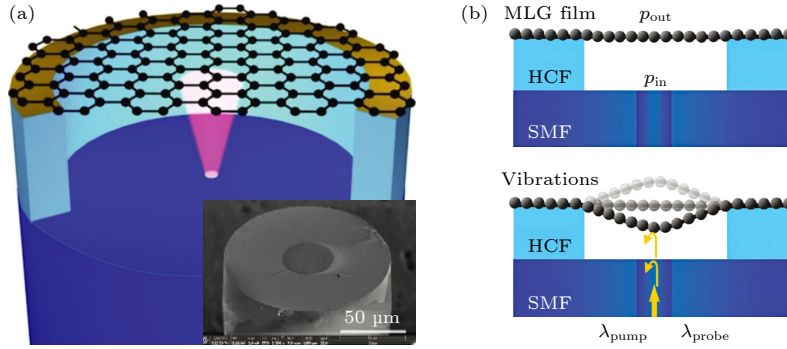


图 7 (a) 光机械式真空传感器结构示意图, 右下角插图为光纤微腔传感器光纤端面显微镜视图; (b) 通过监测光机械谐振器的谐振频率来检测真空引起的张力变化^[108]

Fig. 7. (a) Schematic diagram of the optomechanical pressure sensor structure, with the inset at the lower right showing a microscope view of the fiber end face of the fiber-optic microcavity sensor; (b) detection of pressure-induced tension changes by monitoring the resonant frequency of the optomechanical resonator^[108].

以表示为^[109]

$$\Delta P = \frac{4\sigma_0 t}{r^2} x + \frac{2Et}{(1-\nu)r^4} x^3, \quad (8)$$

其中 x 是薄膜圆心偏离原平衡位置的距离, σ_0 为预张力, t 和 r 分别为圆形薄膜的厚度和半径, ν 是泊松比, E 是薄膜的杨氏模量. 薄膜的谐振频率可以表示为^[109]

$$f_{mn} = \frac{\alpha_{mn}}{2\pi r} \sqrt{\frac{S}{\rho t}}, \quad (9)$$

式中 α_{mn} 是一个常数, 其下标 m 和 n 分别表示薄膜振动时节点直径和节点圈的个数; S 和 ρ 分别为薄膜边界单位长度的均匀张力和质量密度, 而 $S = \sigma t$, 于是压强差 ΔP 可以表示为薄膜谐振频率的函数^[109]:

$$f_{mn}^3 \approx \left(\frac{\alpha_{mn}}{2\pi r} \right)^3 \sqrt{\frac{2Er^2}{64(1-\nu)t^2\rho^3} \Delta P}. \quad (10)$$

通过特定实验仪器监测得到的峰值对应于不同 m, n 的谐振频率, 进而可以计算得到薄膜两端的气压差, 再人为恒定薄膜内的压强, 就可以得到薄膜外即真空气室的真空度.

光纤微腔式真空传感器的测量灵敏度高, 线性响应良好, 对温度变化不敏感, 且适用于动态测量^[109]. 该类传感器直接在单模光纤尖端形成全熔石英微腔, 结构简单、微型且坚固, 无需多部件组装、黏合或抛光. 微腔制作仅需熔接机, 工艺简单、快速且成本低廉, 其带尾纤的光纤光学读取模式, 仅需将传感器探头封装在真空气室内部, 便于与微小型真空气室集成. 但对于薄膜型传感器, 存在的泄漏问题不容忽视, 仍需优化薄膜表面处理与密封工艺,

改善薄膜的附着与密封性能. 同时全石英微腔的测量灵敏度与壁厚成反比, 但壁厚过薄又会降低机械强度, 所以需要探寻新型薄膜材料 (如石墨烯、氮化硅、碳化硅等超薄超高强度的材料), 从而提高传感器的灵敏度. 对上述几种微型真空压强测量方法的总结对比列在表 2 中.

表 2 典型微型真空测量方法总结

Table 2. Summary of typical micro-vacuum measurement methods.

监测方法	技术原理	探测传感器尺寸	当前监测极限/Pa	文献
冷原子	原子寿命监测	$\approx 100 \text{ mm}$	10^{-8}	[91,95]
囚禁微粒	光强二阶相干分析	微米级	10^{-5}	[99]
光学薄膜	光学传感器	$\approx 1 \text{ mm}$	10^{-6}	[107]
光纤微腔	光纤法布里-珀罗腔	$40\text{--}75 \text{ }\mu\text{m}$	10^{-5}	[108]

4 总结与展望

本文全面回顾了小型化冷原子真空气室及其微型真空测量方法的研究进展. 真空气室的微型化已从理论探索逐渐迈向实际应用, 形成了材料性能优化、系统结构创新、被动泵浦技术和微纳集成工艺等多条技术路线. 通过选用钛、特种玻璃与陶瓷等低放气、低渗透的真空材料, 并结合激光焊接、阳极键合等先进封装工艺, 成功研制出可长期维持超高真空的微小型腔体. 集成化的系统结构设计, 如光栅磁光阱和超表面光学元件的应用, 显著降低了系统的光学复杂度与整体体积. 这些技术成果表明, 冷原子系统正从实验室测试阶段转向实际

应用,从庞大复杂的实验室装置转化为紧凑、低功耗且可便携转移的微型传感设备。

目前冷原子系统的微型化发展仍面临诸多挑战。1) 真空水平的长期维持: 虽然被动式小型真空气室的真空度水平已经达到实现冷原子磁光阱的真空度要求,但是进一步实现冷原子的精密测量应用,则需要进一步提高真空度到 10^{-8} — 10^{-9} mbar 量级,这需从封装材料、工艺和被动维持技术进一步攻关。微型腔体的真空寿命主要受限于内部真空放气与外界氦渗透,由此需探索并研发真空性能更优异的新型材料,如经特殊表面处理的非晶态金属、具有致密纳米晶结构的陶瓷复合材料,或开发新型多层阻隔膜结构。同时,对于被动泵浦方案来说,提升吸气剂的吸气容量、吸气速率和可逆再生能力是延长真空系统维护周期的核心,开发复合型吸气剂(如 Zr-V-Fe 与活性炭结合)或通过微加热、光激活等技术实现吸气剂的可逆再生,是当前该领域的主要发展趋势。2) 片上集成与鲁棒性: 真正意义上的“芯片级”冷原子系统,要求将真空、光学、磁场、控制系统及探测系统集成在微小体积内,这需要优化原子源输送、磁场线圈芯片或纳米刻蚀电路、集成光子电路与系统热传导设计等之间的协同匹配。此外,系统须具备承受振动、冲击、辐射等极端环境的能力,才能有效拓宽其应用场景。3) 全新理论基础与系统架构的探索: 思考是否能脱离传统磁光阱基础,探索如暗光学晶格、电磁感应透明冷却等对真空依赖较低的新型冷却与囚禁方案。4) 真空测量精度与稳定性: 微型真空系统的进一步发展迫切需要建立高精密度、高灵敏度且适配微型系统的新型真空计量标准。目前几种主要的微型真空测量方法仍存在明显缺陷,如冷原子测量技术由于背景气体和冷原子之间复杂的作用机制,测量混合气体分压时难以具体分辨气体种类,未来需要深入研究损失率系数气体差异性的本质,不断完善冷原子与混合气体相互作用的理论模型^[110]; 光学悬浮纳米颗粒受制于腔体内部的光学访问和囚禁稳定性,但如果结合离子阱技术,借助静电场与射频场囚禁微粒,或可规避光学悬浮对激光功率和光束指向稳定性的苛刻要求^[111,112]; 光机械薄膜的阻尼特性易受温度与表面吸附效应影响,导致测量漂移。Veselá 等^[113]的研究表明,在光学薄膜振子表面沉积 5—10 nm 的 Si_3 或 Al_2 钝化层,阻隔环境与功能层的接触,可以有效抑制氧化与水蒸气吸附引

起的漂移。或可将 Sun 等^[114]利用相反热光色散材料实现温度自补偿的设计思想引入光学薄膜振子结构构建中,从根本上降低温度敏感性。而光纤微腔传感器的灵敏度取决于薄膜壁厚以及光纤微腔的光学和机械品质因子,目前基于频率响应测量的极限真空度在 10^{-5} Pa 量级^[108],未来需要探寻超薄超高强度的新型薄膜材料(如石墨烯、二硫化钼、碳化硅等)的光纤微腔传感器,提高薄膜频率对真空度的响应灵敏度和响应区间,从而实现超高灵敏度的真空检测。

在深空探测、地球科学、资源勘探、量子信息科学以及基础物理测量等前沿领域,高灵敏度、高精度的冷原子技术正发挥着日益关键的支撑作用,成为推动这些学科取得突破性进展的重要驱动力。面向未来科技发展的重大战略需求,冷原子系统的微型化与集成化研究不仅具有深远的科学意义,也展现出广阔的应用前景。当前,小型化冷原子系统以及与之配套的微型腔室真空测量技术,正加速从实验室原理验证阶段迈向实际现场应用。要应对这一转型过程中面临的诸多挑战,不仅需要基础理论层面的持续创新与突破,更有赖于与材料科学、微纳工程、集成光子学等学科的深度交叉融合。可以预见,随着相关技术的不断成熟,下一代冷原子传感器将兼具更高的测量精度、更强的便携性以及良好的鲁棒性,必将有力推动精密测量、真空科学、基础物理学及相关交叉领域实现跨越式发展。

参考文献

- [1] Chu S, Hollberg L, Bjorkholm J E, Cable A, Ashkin A 1985 *Phys. Rev. Lett.* **55** 48
- [2] Schawlow A L, Townes C H 1958 *Phys. Rev.* **112** 1940
- [3] Wineland D J, Drullinger R E, Walls F L 1978 *Phys. Rev. Lett.* **40** 1639
- [4] Hänsch T W, Schawlow A L 1975 *Opt. Commun.* **13** 68
- [5] Ashkin A 1970 *Phys. Rev. Lett.* **24** 156
- [6] Wang Y Q 2007 *Laser Cooling and Trapping (I)* (1st Ed.) (Beijing: Beijing Science Press) p2 (in Chinese) [王义道 2007 原子的激光冷却与陷阱 (I) (北京: 北京科学出版) 第 2 页]
- [7] Garrido Alzar C L 2019 *AVS Quantum Sci.* **1** 4702
- [8] Zhang Q X, Wang Y R, Zhu C H, Wang Y X, Zhang X, Gao K Y, Zhang W 2020 *Chin. Phys. B* **29** 093203
- [9] Szigeti S S, Hosten O, Haine S A 2021 *Appl. Phys. Lett.* **118** 140501
- [10] Migliaccio F, Reguzzoni M, Batsukh K, Tino G M, Rosi G, Sorrentino F, Braitenberg C, Pivetta T, Barbolla D F, Zoffoli S 2019 *Surv. Geophys.* **40** 1029
- [11] Narducci F A, Black A T, Burke J H 2022 *Adv. Phys.: X* **7** 1946426
- [12] Fang J, Wang W Z, Zhou Y, et al. 2024 *Remote Sens.* **16**

- 2634
- [13] Cohen Y, Jadeja K, Sula S, Venturelli M, Deans C, Marmugi L, Renzoni F 2019 *Appl. Phys. Lett.* **114** 073505
 - [14] Ma Z, Han C Y, Tan Z, He H H, Shi S Z, Kang X, Wu J T, Huang J H, Lu B, Lee C H 2025 *Sci. Adv.* **11** eadt3938
 - [15] Scherschligt J, Fedchak J A, Barker D S, Eckel S, Klimov N, Makrides C, Tiesinga E 2017 *Metrologia* **54** S125
 - [16] Barker D S, Acharya B P, Fedchak J A, Klimov N N, Norrgard E B, Scherschligt J, Tiesinga E, Eckel S P 2022 *Rev. Sci. Instrum.* **93** 121101
 - [17] Gellesch M, Jones J, Barron R, Singh A, Sun Q, Bongs K, Singh Y 2020 *Adv. Opt. Technol.* **9** 313
 - [18] Dai S Y, Zheng F S, Liu K, Chen W L, Lin Y G, Li T C, Fang F 2021 *Chin. Phys. B* **30** 013701
 - [19] Babcock-Chi J, Trapani L, Akos D 2023 *Proceedings of the 2023 International Technical Meeting of the Institute of Navigation Long Beach, California, January 25–27, 2023* p34
 - [20] Travagnin M 2020 *Cold Atom Interferometry for Inertial Navigation Sensors: Technology Assessment: Space and Defence Applications* (1st Ed.) (Luxembourg: Publications Office of the European Union) pp1–45
 - [21] Abend S, Allard B, Arnold A S, et al. 2023 *AVS Quantum Sci.* **5** 019201
 - [22] Zhao G D, Xia J, Liu Y, et al. 2025 *Chin. Phys. Lett.* **42** 063701
 - [23] Li J T, Chen X, Zhang D F, et al. 2025 *Natl. Sci. Rev.* **12** nwaf012
 - [24] Bloch I, Dalibard J, Nascimbene S 2012 *Nat. Phys.* **8** 267
 - [25] Halimeh J C, Aidelsburger M, Grusdt F, Hauke P, Yang B 2025 *Nat. Phys.* **21** 25
 - [26] Chen B B, Chen C, Chen Z Y, Cui J, Zhai Y Y, Weichselbaum A, von Delft J, Meng Z Y, Li W 2021 *Phys. Rev. B* **103** 041107
 - [27] Xu P, He X D, Liu M, Wang J, Zhan M S 2019 *Acta Phys. Sin.* **68** 030305 (in Chinese) [许鹏, 何晓东, 刘敏, 王谨, 詹明生 2019 物理学报 **68** 030305]
 - [28] Radnaev A, Chung W, Cole D, et al. 2025 *PRX Quantum* **6** 030334
 - [29] Li X, Hou J Y, Wang J C, et al. 2025 *Nat. Commun.* **16** 9728
 - [30] Bluvstein D, Geim A A, Li S H, et al. 2026 *Nature* **649** 39
 - [31] Badurina L, Buchmueller O, Ellis J, Lewicki M, McCabe C, Vaskonen V 2022 *Philos. Trans. R. Soc. A* **380** 20210060
 - [32] Blas D, Carlton J, McCabe C 2025 *Phys. Rev. D* **111** 115020
 - [33] Zhou L, Yan S T, Ji Y H, et al. 2022 *Front. Phys.* **10** 1039119
 - [34] Schützhold R 2025 *Prog. Part. Nucl. Phys.* **145** 104198
 - [35] Horchani R, Al-Shaqsi A 2025 *AVS Quantum Sci.* **7** 013501
 - [36] Ding Y, Zhang S, Albrecht A R, et al. 2025 *arXiv: 2512.10162* [physics.optics]
 - [37] Shin D C, Hayward T M, Fife D, Menon R, Sudhir V 2025 *Optica* **12** 473
 - [38] Bongs K, Boyer V, Cruise M, et al. 2016 *Proc. SPIE* **9900** 990009
 - [39] Perez M A, Salim E, Farkas D, Duggan J, Ivory M, Anderson D 2014 *Optical Trapping and Optical Micromanipulation XI* San Diego, California, August 17–21, 2014 p25
 - [40] Kitching J 2018 *Appl. Phys. Rev.* **5** 1302
 - [41] McGilligan J, Gallacher K, Griffin P, Paul D, Arnold A, Riis E 2022 *Rev. Sci. Instrum.* **93** 091101
 - [42] Li D Z, He W F, Shi S N, Wu B, Xiao Y H, Lin Q, Li L 2023 *Sensors* **23** 5089
 - [43] Rushton J, Aldous M, Himsworth M 2014 *Rev. Sci. Instrum.* **85** 121501
 - [44] Zhao Y P, Li D R, Niu J Y, et al. 2024 *IEEE Sens. J.* **24** 40507
 - [45] Lu S B, Fu J H, Jiang M, et al. 2025 *Rev. Sci. Instrum.* **96** 013201
 - [46] Bidel Y, Carraz O, Charrière R, Cadoret M, Zahzam N, Bresson A 2013 *Appl. Phys. Lett.* **102** 144107
 - [47] Lee J, Ding R, Christensen J, et al. 2022 *Nat. Commun.* **13** 5131
 - [48] Earl L, Vovrosh J, Wright M, et al. 2022 *Atoms* **10** 32
 - [49] Elvin R, Wright M W, Lewis B, Keliehor B L, Bregazzi A, McGilligan J P, Arnold A S, Griffin P F, Riis E 2020 *Adv. Opt. Technol.* **9** 297
 - [50] Manetsch H J, Nomura G, Bataille E, Lv X, Leung K H, Endres M 2025 *Nature* **647** 60
 - [51] Li D T, Wang Y J, Zhang H Z, Xi Z H, Li G 2021 *Space Sci. Technol.* **1** 21
 - [52] Roth A, Hablanian M H 1976 *Vacuum Technology* (1st Ed.) (Amsterdam: American Institute of Physics) pp52, 53
 - [53] Scherschligt J, Fedchak J A, Ahmed Z, et al. 2018 *J. Vac. Sci. Technol. A* **36** 04801
 - [54] Eckel S, Barker D S, Fedchak J A, Klimov N N, Norrgard E, Scherschligt J, Makrides C, Tiesinga E 2018 *Metrologia* **55** 182
 - [55] Fedchak J A, Abbott P J, Hendricks J H, Arnold P C, Peacock N T 2018 *J. Vac. Sci. Technol. A* **36** 030802
 - [56] Ahedo E, Merino M 2012 *Phys. Plasmas* **19** 083501
 - [57] Grinham R, Chew A 2017 *Appl. Sci. Conver. Technol.* **26** 95
 - [58] Cheng S C 2024 *AIMS Mater. Sci.* **11** 438
 - [59] Schlosser J, Chappuis P, Chatelier M, Cordier J, Deschamps P, Garampon L, Guilhem D, Lipa M, Mitteau R 1995 *Fusion Eng. Des.* **27** 203
 - [60] Fan Y S, Du C T, Zhang H Y, Zheng S X, Xing Q Z, Wang X W, Yan Y H, Wang M W, Wang Z M 2024 *Chin. J. Vac. Sci. Technol.* **44** 797 (in Chinese) [范永山, 杜畅通, 张化一, 郑曙昕, 邢庆子, 王学武, 闫逸花, 王敏文, 王忠明 2024 真空科学与技术学报 **44** 797]
 - [61] Segovia J D 1999 *CAS - CERN Accelerator School: Vacuum Technology Snekersten Denmark, May 28–Jun 3, 1999* p99
 - [62] Zhuang L L, Jin S T 2022 *Gansu Metall.* **44** 61 (in Chinese) [庄丽丽, 靳塞特 2022 甘肃冶金 **44** 61]
 - [63] Jiang X J, Zhou Y K, Tan C L, Ma M Z, Liu R P 2014 *Mater. Des.* **64** 21
 - [64] Fedchak J A, Scherschligt J K, Avdiaj S, Barker D S, Eckel S P, Bowers B, O'Connell S, Henderson P 2021 *J. Vac. Sci. Technol. B* **39** 024201
 - [65] Yuan G J, Lu Y H, Luo J R, Yan X, Wu E S, Guo H Z 2004 *Chin. J. Vac. Sci. Technol.* **24** 299 (in Chinese) [袁广江, 卢玉华, 罗积润, 阎旭, 吴尔生, 郭和忠 2004 真空科学与技术学报 **24** 299]
 - [66] Li J M, Wang J W, Liu J N, et al. 2023 *Vacuum* **60** 60 (in Chinese) [李津铭, 王进伟, 刘俊男, 等 2023 真空 **60** 60]
 - [67] Christ M, Zimmermann C, Neinert S, Leykauf B, Döringshoff K, Krutzik M 2024 *Adv. Quantum Technol.* **7** 2400076
 - [68] Pei Y J, Li W M, Jiang D M, Wang X Q 1995 *Proceedings Particle Accelerator Conference TX Dallas, USA, May 1–5, 1995* p2023
 - [69] Carlé C, Mursa A, Karvinen P, Keshavarzi S, Abdel Hafiz M, Maurice V, Boudot R, Passilly N 2024 *J. Appl. Phys.* **136** 085102

- [70] Cooper N, Coles L, Everton S, et al. 2021 *Addit. Manuf.* **40** 101898
- [71] Dobrovinskaya E R, Lytvynov L A, Pishchik V 2009 *Sapphire: Material, Manufacturing, Applications* (1st Ed) (Berlin: Springer) pp55–176
- [72] O'Neill G 1962 *International Conference on High Energy Accelerators: Proceedings* Upton, New York, USA, September 6–12, 1962 p247
- [73] Liu Y C 2023 *China Ceram.* **59** 101 (in Chinese) [刘要才 2023 中国陶瓷 **59** 101]
- [74] Dellis A T, Shah V, Donley E A, Knappe S, Kitching J 2016 *Opt. Lett.* **41** 2775
- [75] Wang X, Li H, Nie J S, et al. 2008 *Opt. Optoelectron. Technol.* **6** 49 (in Chinese) [王玺, 李化, 聂劲松, 等 2008 光学与光电技术 **6** 49]
- [76] Madkhaly S, Coles L, Morley C, Colquhoun C, Fromhold T, Cooper N, Hackermüller L 2021 *PRX Quantum* **2** 030326
- [77] Qing L P, Wei B, Xiao Z F, Ping W L, Chen F, Qian Q 2024 *Glass* **51** 29 (in Chinese) [青礼平, 韦奔, 肖子凡, 平文亮, 陈峰, 钱奇 2024 玻璃 **51** 29]
- [78] Nielsen T, Leipold M 1963 *J. Am. Ceram. Soc.* **46** 381
- [79] Watanabe H, Yamada N, Okaji M 2004 *Int. J. Thermophys.* **25** 221
- [80] Egan P F 2024 *Int. J. Thermophys.* **45** 131
- [81] Bien-Aimé K, Belin C, Gallais L, Grua P, Fargin E, Neuport J, Tovenca-Pecault I 2009 *Opt. Express* **17** 18703
- [82] Ribbing C, Strid N, Rangsten P, Tirén J 2002 *Biomed. Microdevices* **4** 285
- [83] Chiggiato P 2020 arXiv: 2006.07124 [Physics.acc-ph, Physics.ins-det]
- [84] Kovalov S, Beznosenko I, Vasyliov A, Sotnikov G 2025 arXiv: 2511.16686 [physics.ins-det]
- [85] Ha T, Shin H 2021 *Appl. Sci.* **11** 11762
- [86] Marcus C, Biewer T, Jugan A, Klepper C, Quinlan B 2024 *Proceeding of the 67th Annual Technical Conference* Proceeding Chicago, American, May 6–9, 2024 p35
- [87] Xie H T, Chen B, Long J B, Xue C, Chen L K, Chen S 2020 *Chin. Phys. B* **29** 093701
- [88] Tell D 2024 *Ph. D. Dissertation* (Hannover: Institutionelles Repositorium der Leibniz University)
- [89] Basu A, Velásquez-García L F 2016 *J. Microeng. Microeng.* **26** 124003
- [90] Isichenko A, Chauhan N, Bose D, Wang J, Kunz P D, Blumenthal D J 2023 *Nat. Commun.* **14** 3080
- [91] Little B J, Hoth G W, Christensen J, Walker C, De Smet D J, Biedermann G W, Lee J, Schwindt P D 2021 *AVS Quantum Sci.* **3** 035001
- [92] Burrow O S, Osborn P F, Boughton E, Mirando F, Burt D P, Griffin P F, Arnold A S, Riis E 2021 *Appl. Phys. Lett.* **119** 124002
- [93] McGilligan J P, Moore K R, Dellis A, Martinez G, de Clercq E, Griffin P, Arnold A, Riis E, Boudot R, Kitching J 2020 *Appl. Phys. Lett.* **117** 054001
- [94] Monroe C, Swann W, Robinson H, Wieman C 1990 *Phys. Rev. Lett.* **65** 1571
- [95] Supakar S, Singh V, Tiwari V, Mishra S 2023 *J. Appl. Phys.* **134** 024403
- [96] Barker D S, Fedchak J A, Klos J, Scherschligt J, Sheikh A A, Tiesinga E, Eckel S P 2023 *AVS Quantum Sci.* **5** 035001
- [97] Arpornthip T, Sackett C, Hughes K 2012 *Phys. Rev. A* **85** 033420
- [98] Moore R W, Lee L A, Findlay E A, Torralbo-Campo L, Bruce G D, Cassettari D 2015 *Rev. Sci. Instrum.* **86** 093108
- [99] Liu L H, Zheng Y, Tian Y, Wang L, Guo G C, Sun F W 2024 *Phys. Rev. Appl.* **22** 041006
- [100] Zheng Y, Sun F W 2019 *Chin. Opt. Lett.* **17** 060901
- [101] Beresnev S, Chernyak V, Fomyagin G 1990 *J. Fluid Mech.* **219** 405
- [102] Nikkhou M, Hu Y, Sabin J A, Millen J 2021 *Photonics* **8** 458
- [103] Bykov D S, Mestres P, Dania L, Schmöger L, Northup T E 2019 *Appl. Phys. Lett.* **115** 034101
- [104] Li C H, Ma Y Y, Wang J C, et al. 2024 *ACS Appl. Nano Mater.* **7** 25493
- [105] Cavalleri A, Ciani G, Dolesi R, Hueller M, Nicolodi D, Tombolato D, Vitale S, Wass P J, Weber W J 2009 *Phys. Rev. A* **103** 140601
- [106] Martinetz L, Hornberger K, Stickler B A 2018 *Phys. Rev. E* **97** 052112
- [107] Green O R, Bao Y, Lawall J R, Gorman J J, Barker D S 2025 *Phys. Rev. Appl.* **24** 024069
- [108] Chen Y P, Liu S, Hong G Q, Zou M Q, Liu B N, Luo J X, Wang Y P 2022 *ACS Appl. Mater. Interfaces* **14** 39211
- [109] Ma J 2014 *Ph. D. Dissertation* (Hong Kong: Hong Kong Polytechnic University)
- [110] Kang X J, Feng Y, Dong M, Feng C, Zhang Y F, Sun W J 2025 *Chin. J. Vac. Sci. Technol.* **45** 834 (in Chinese) [康小洁, 冯焱, 董猛, 冯村, 张亚飞, 孙雯君 2025 真空科学与技术学报 **45** 834]
- [111] Dania L, Bykov D S, Goschin F, Teller M, Kassid A, Northup T E 2024 *Phys. Rev. Lett.* **132** 133602
- [112] Rybin V, Rudyi S, Rozhddestvensky Y 2022 *Int. J. Non-Linear Mech.* **147** 4227
- [113] Veselá P, Hlubučková M, Kancíř V, Václavík J, Židek K 2025 *Sci. Rep.* **15** 29145
- [114] Sun J, Hu J, Li L, Zhao J 2024 *J. Opt.* **26** 095801

INSTRUMENTATION AND MEASUREMENT

Research progress on miniaturized cold-atom vacuum chambers and micro-scale vacuum measurement techniques*

MA Zheyu ^{1)2)#} CAI Yu ^{2)3)#} QIN Qiang ²⁾ TANG Rui ²⁾⁴⁾ WANG Xiangting ²⁾
 CHEN Baitong ²⁾ ZHOU Feng ^{2)†} ZHAN Mingsheng ²⁾

1) (*School of Mathematics and Physics, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430071, China*)

2) (*Innovation Academy for Precision Measurement Science and Technology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China*)

3) (*School of Physics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China*)

4) (*School of Electrical and Information Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China*)

(Received 17 March 2026; revised manuscript received 17 March 2026)

Abstract

As a fundamental cornerstone of modern atomic physics, laser cooling has fostered the rapid development of cold-atom physics, which exhibits irreplaceable application value in cutting-edge fields such as quantum frequency standards, quantum information, and precision inertial sensing. The transition of cold-atom technologies from laboratory research to field deployment hinges critically on system integration and miniaturization. This paper presents a systematic review of recent advances in miniaturized cold-atom vacuum systems. We analyze in depth the vacuum contamination mechanisms, including helium permeation, material outgassing, leakage, and backstreaming. We summarize the material selection principles for micro/nano-scale vacuum chambers featuring low outgassing and low permeability, and highlight advanced design schemes and packaging processes—such as metal 3D printing, miniaturized pumping, chip-scale integration, anodic bonding, and laser welding—as well as the technical merits and implementation pathways of passive pumping for long-term vacuum maintenance. To address the lack of *in-situ*, high-precision, and highly compatible vacuum measurement methods for micro vacuum cells, we systematically categorize four technical routes based on cold atoms, trapped microparticles, optical thin films, and fiber microcavities. The operating principles, performance metrics, advantages, limitations, and miniaturization adaptability of each method are clarified. Finally, we identify the key challenges facing miniaturized cold-atom systems, including long-term vacuum maintenance, on-chip multi-system integration, robustness under extreme environments, and the establishment of vacuum metrology standards. Broad application prospects in deep-space exploration, resource exploration, quantum information, and fundamental physics verification are discussed. This review aims to provide theoretical references and technical support for the research, development, and application of next-generation integrated, portable, and highly reliable cold-atom quantum devices.

Keywords: miniaturized cold atomic vacuum chamber, vacuum materials, passive pumping, vacuum measurement

DOI: [10.7498/aps.75.20260382](https://doi.org/10.7498/aps.75.20260382)

CSTR: [32037.14.aps.75.20260382](https://cstr.cn/32037.14.aps.75.20260382)

* Project supported by the National Key R&D Program of China (Grant No. 2025YFF0515200).

These authors contributed equally.

† Corresponding author. E-mail: zhoufeng@apm.ac.cn



小型冷原子真空气室及微型真空测量方法研究进展

马哲煜 蔡雨 秦强 唐蕊 王翔厅 陈柏通 周锋 詹明生

Research progress on miniaturized cold-atom vacuum chambers and micro-scale vacuum measurement techniques

MA Zheyu CAI Yu QIN Qiang TANG Rui WANG Xiangting CHEN Baitong ZHOU Feng ZHAN Mingsheng

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 75, 180301 (2026) DOI: 10.7498/aps.75.20260382

CSTR: 32037.14.aps.75.20260382

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.75.20260382>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于磁光阱中 ^6Li 冷原子的真空度测量

Vacuum pressure measurement based on ^6Li cold atoms in a magneto-optical trap

物理学报. 2022, 71(9): 094204 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20212204>

基于 ^7Li 冷原子操控的超高真空测量

Ultra-high vacuum measurement based on ^7Li cold atoms manipulation

物理学报. 2024, 73(22): 220601 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20241215>

真空封装含Herriott多反射腔原子气室及其在原子磁力仪中的应用

Atomic vapor cells with Herriott-cavity sealed under vacuum and their applications in atomic magnetometry

物理学报. 2025, 74(11): 110702 <https://doi.org/10.7498/aps.74.20250220>

超高真空原子尺度 $\text{Au}_x/\text{Si}(111)-(7 \times 7)$ 表面吸附的电荷分布测量

Measurement of distribution of charge adsorbed on $\text{Au}_x/\text{Si}(111)-7 \times 7$ surface on an atomic scale in ultra-high vacuum

物理学报. 2023, 72(11): 110701 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230051>

室温超高真空环境原子尺度 $\text{Au}/\text{Si}(111)-(7 \times 7)$ 不定域吸附的局域接触势能差测量技术

Measurement of local contact potential difference of atomic scale $\text{Au}/\text{Si}(111)-(7 \times 7)$ delocalized adsorption state in room-temperature and ultra-high vacuum environment

物理学报. 2022, 71(6): 060702 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211853>

真空虚拟阴极测量的绝对误差分析

Absolute error analysis of vacuum virtual cathode measurement

物理学报. 2025, 74(24): 247901 <https://doi.org/10.7498/aps.74.20251188>