

高精度光学参考腔的自主化研制

刘军 陈帛雄 许冠军 崔晓旭 白波 张林波 陈龙 焦东东 王涛 刘涛 董瑞芳 张首刚

Self-reliance and independently developed high-finesse spherical ultrastable optical reference cavity

Liu Jun Chen Bo-Xiong Xu Guan-Jun Cui Xiao-Xu Bai Bo Zhang Lin-Bo Chen Long Jiao Dong-Dong Wang Tao Liu Tao Dong Rui-Fang Zhang Shou-Gang

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, **66**, 080601 (2017) DOI: 10.7498/aps.66.080601

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.080601>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2017/V66/I8>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

光学薄膜诱导偏振像差对大数值孔径光学系统聚焦特性的影响

Effect of coating-induced polarization aberrations on the focusing properties in high numerical aperture optical system

物理学报.2015, 64(15): 154214 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.154214>

一种用保角变换求解带电 Kelvin 电容器边缘效应所产生静电力的解析模型

Analytical model of electrostatic force generated by edge effect of a Kelvin capacitor based on conformal transformation

物理学报.2015, 64(6): 060601 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.060601>

光梯度力驱动纳谐振器的非线性动力学特性研究

Nonlinear dynamic analysis of nano-resonator driven by optical gradient force

物理学报.2014, 63(2): 026201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.026201>

激光诱导叶绿素荧光寿命的测量及其特性分析

Laser-induced chlorophyll fluorescence lifetime measurement and characteristic analysis

物理学报.2013, 62(19): 190601 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.190601>

高精度光学参考腔的自主化研制*

刘军¹⁾²⁾ 陈帛雄³⁾ 许冠军²⁾ 崔晓旭³⁾ 白波³⁾ 张林波²⁾ 陈龙²⁾
焦东东²⁾ 王涛³⁾ 刘涛^{2)†} 董瑞芳²⁾ 张首刚²⁾

1)(中国科学院大学, 北京 100049)

2)(中国科学院国家授时中心, 时间频率基准实验室, 西安 710600)

3)(中航工业西安飞行自动控制研究所, 西安 710065)

(2016年9月29日收到; 2017年1月18日收到修改稿)

高精度超稳光学参考腔是获得超窄线宽激光的核心部件. 本文报道了面向空间应用的高精度球形超稳光学参考腔自主化研制及其初步测试结果. 设计球形腔体直径为 80 mm, 腔长 78 mm, 采用平-凹腔镜结构, 凹镜曲率半径为 0.5 m. 使用有限元方法计算了该参考腔的震动敏感度, 最佳支撑位置的震动敏感度小于 $1 \times 10^{-10}/g$. 采用超光滑表面三级抛光技术实现光学表面粗糙度小于 0.4 nm(rms) 的超精密加工, 采用双离子束溅射法实现工作波长反射率大于 99.999%、损耗小于 4 ppm 腔镜镀膜, 干式光胶方法键合腔体和腔镜. 利用扫腔线宽法和腔衰荡法对参考腔的线宽和精细度进行了测量, 结果表明该参考腔的精细度约为 195000, 线宽为 9.8 kHz. 将 698 nm 半导体激光器锁定到该参考腔上测得其损耗 <5 ppm. 与实验室进口同类型参考腔相比较, 主要性能指标与其相当.

关键词: 超稳腔, 超低膨胀系数, 精细度, 光钟

PACS: 06.20.F-, 42.79.Wc, 62.25.Jk, 78.20.Jq

DOI: 10.7498/aps.66.080601

1 引言

近年来, 基于超低膨胀系数 (ultra-low expansion, ULE) 材料的高精度 (通常大于 100000) 光学超稳参考腔^[1-6] 技术取得了巨大进展, 它是利用 Pound-Drever-Hall (PDH) 技术^[7] 获得超稳激光的核心部件. 超稳激光具有极高的光谱纯度、优良的时空相干性及短期频率稳定度等特性, 因此超稳光学参考腔在光钟^[8-10]、低噪声微波信号产生^[11,12]、引力波探测^[13,14] 和光学频率传递^[15] 等领域具有极重要的应用价值. 目前世界上最先进的基于超稳光学参考腔稳频的激光系统的线宽已达几十 mHz 水平, 而频率短期稳定度已达到 $10^{-16}/s$ ^[4,5,16,17]. 基于超稳腔的激光稳频, 激光频率稳定度 $\delta\nu/\nu = -\delta L/L$ 受限于参考腔的腔长稳定

度, 式中 ν 为腔内激光场的共振频率, L 为腔长, δL 和 $\delta\nu$ 分别为机械震动、热、声音等外部环境及腔镜布朗噪声^[18-25] 引起的腔长变化量和对应的腔共振频率的变化量. 实际应用中的超稳腔体通常采用震动不敏感支撑结构设计^[21,23,24], 并对其施以隔震和隔声等措施后, 其腔长变化主要来自热膨胀, 因此通常采用超低热膨胀系数材料, 如 ULE、单晶硅^[16] 等作为腔体材料. 具有优良的光学、热学和机械特性的材料是研制超稳光学参考腔的物质基础, 现代超精密光学加工制造及光学加工检测手段和镀膜技术推动了超稳腔相关研究及应用领域的发展.

超稳光学参考腔的加工制造涉及多方面的技术难题, 主要体现在如下几个方面: 1) 光学平面及光胶平面的高平整度 (表面质量达到 10-5)、超低粗糙度 (<1 nm)^[26] 和高面形控制^[27] 光学加工; 2) 腔

* 国家重大科研仪器设备研制专项 (批准号: 61127901)、国家自然科学基金 (批准号: 11273024, 61025023) 和国家自然科学基金青年科学基金 (批准号: 11403031) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: taoliu@ntsc.ac.cn

镜基片超高反射率(通常 >99.99%)^[28]、超低损耗(通常 <10 ppm (1 ppm = 1/1000000))^[29]、单层膜厚度高精度控制的多层镀膜; 3) 腔体和腔镜等超稳腔光学部件之间高强度无胶光学键合技术^[30].

目前世界上仅有 Stable Laser Systems & Advanced Thin Films 公司掌握超稳光学参考腔生产制造的全部关键技术, 国内开展相关研究的高校和科研单位所需超稳参考腔全部依赖进口, 特殊应用的超稳参考腔随时可能对华禁售. 因此, 面对我国未来空间时频科学工程的战略需求及潜在的军需和民用, 自主研制超稳光学参考腔技术具有重要的意义. 本文设计研制的超稳腔面向空间应用, 鉴于空间震动环境的复杂性, 要求腔体三维抗震性能要好, 因此腔体设计为中心对称的球体结构. 第二部分讨论球形超稳参考腔的结构设计和震动敏感度有限元分析 (finite element analysis, FEA), 计算表明该参考腔最佳支撑位置的震动敏感度小于 $1 \times 10^{-10}/g$ (g 为重力加速度). 第三部分讨论参考腔的加工制造, 并且给出相关测试结果. 最后采用扫腔线宽法^[31]和腔衰荡法 (ring-down)^[32]对该超稳光学参考腔的精细度和线宽进行了测量和分析, 测得其精细度约为 200000, 线宽为 9.8 kHz; 将 698 nm 半导体激光器 (Toptica DL 100) 锁定到该参考腔上测量其损耗小于 5 ppm. 与实验室进口同

类型参考腔相比较, 主要性能指标与其相当.

2 球形超稳参考腔设计

本文报道的超稳腔是针对我国未来空间时频科学工程^[33]的潜在应用而设计和研制的, 工作中心波长为 698.4 nm. 在空间微重力运行环境下, 要求腔体安装固定牢固、并对作用在其上任何方向的作用力不敏感, 重力方向上腔体必须保持在固定的位置, 因此必须要约束腔体所有自由度, 使其对支撑力不敏感, 并且需要考虑来自任何方向的惯性力对腔体震动敏感度所产生的影响^[1,34], 对此我们采用球体结构设计. 按照空间应用的需求, 空间超窄线宽激光器的频率稳定度预期要求为 $10^{-16}/s$ 量级^[35], 考虑到系统在空间工作的震动环境比在地面上恶劣, 参照文献^[4, 7, 36]中的热噪声理论计算公式, 计算该超稳腔的热噪声理论极限为 4.6×10^{-16} . 据此, 在图 1 中, 设计球形腔体直径为 80 mm, 腔长为 78 mm. 腔体选用 ULE 材料, 腔镜基底选用熔石英 (FS), 采用平-凹反射镜结构, 凹镜曲率半径为 0.5 m, 具体设计参数如图 1 中所示. 为了减小腔镜由于温度变化导致的轴向弯曲, 腔镜背面光胶比 FS 的热膨胀系数更小的 ULE 环^[37].

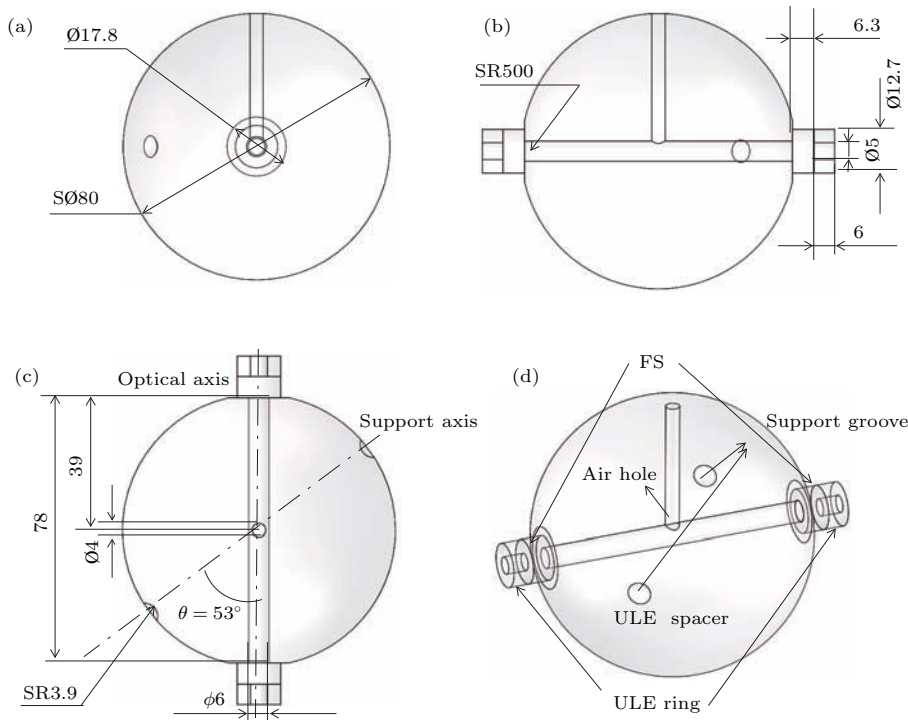


图 1 超稳腔设计图 (a) 主视图; (b) 侧视图; (c) 俯视图; (d) 三维视图

Fig. 1. Design of the ultra-stable cavity: (a) Main view; (b) side view; (c) top view; (d) three dimensions view.

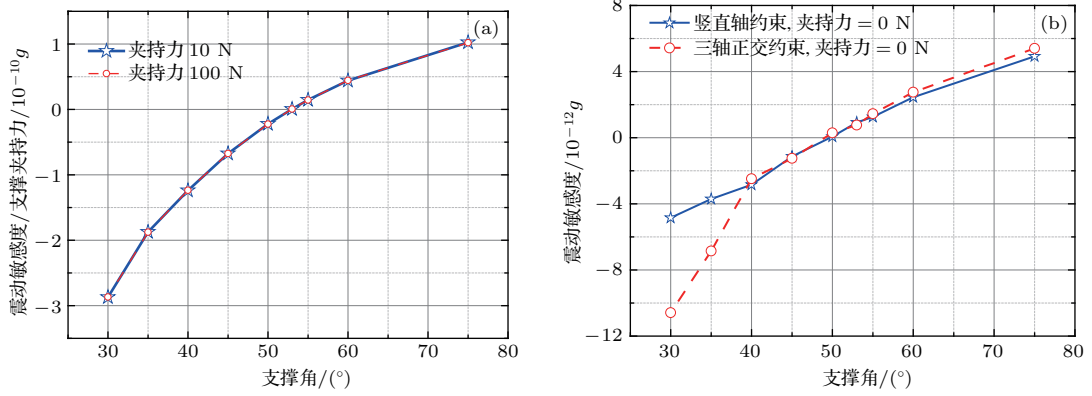


图2 (网刊彩色) 有限元分析球形参考腔力学约束震动敏感性 (a) 不同大小夹持力作用于腔体的震动敏感度曲线; (b) 一维和三维约束条件下腔体震动敏感曲线
 Fig. 2. (color online) The mechanical vibration sensitivity of spherical reference cavity is calculated by finite element analysis: (a) Vibration sensitivity curves by different sizes bear-squeezing force acting on the cavity; (b) vibration sensitivity curves of cavity under the condition of one dimension and three dimensions constraints.

机械震动是导致腔长变化的主要因素之一。使用FEA软件分析计算了该腔体在大小不同的径向支撑夹持力作用下一维及三维约束条件下的震动敏感度。球形参考腔的机械支撑轴与光轴共面, 定义两轴夹角为“支撑角”, 记为 θ 。图2(a)中, 有限元分析结果表明, 在两对大小分别为10和100 N的夹持力作用下, 震动对夹持作用力大小(≤ 100 N)不敏感, 施加夹持作用力的调节冗余度较大, 当 $\theta = 53^\circ$ 时震动敏感度曲线经过零点; 如图2(b), 分别对腔体施加竖直方向一维和三维约束, 当支撑角 $40^\circ < \theta < 75^\circ$ 时, 震动对约束方式也不敏感, 在 50° 附近震动敏感度曲线经过零点。计算结果表明,

该腔最佳支撑点位置($\theta = 53^\circ$)的震动敏感度小于 $1 \times 10^{-10}/g$ 。

3 球形超稳参考腔制造

超稳光学参考腔的加工制造主要分为三个工艺环节: 1) 腔体、腔镜基片和ULE环等部件的光学加工; 2) 腔镜镀膜; 3) 腔体与腔镜及ULE环之间的光学胶合。上述的光学加工和腔镜镀膜及光胶装配完全依靠自主技术研制完成, 主要加工制造流程如图3所示, 下面分别加以介绍。

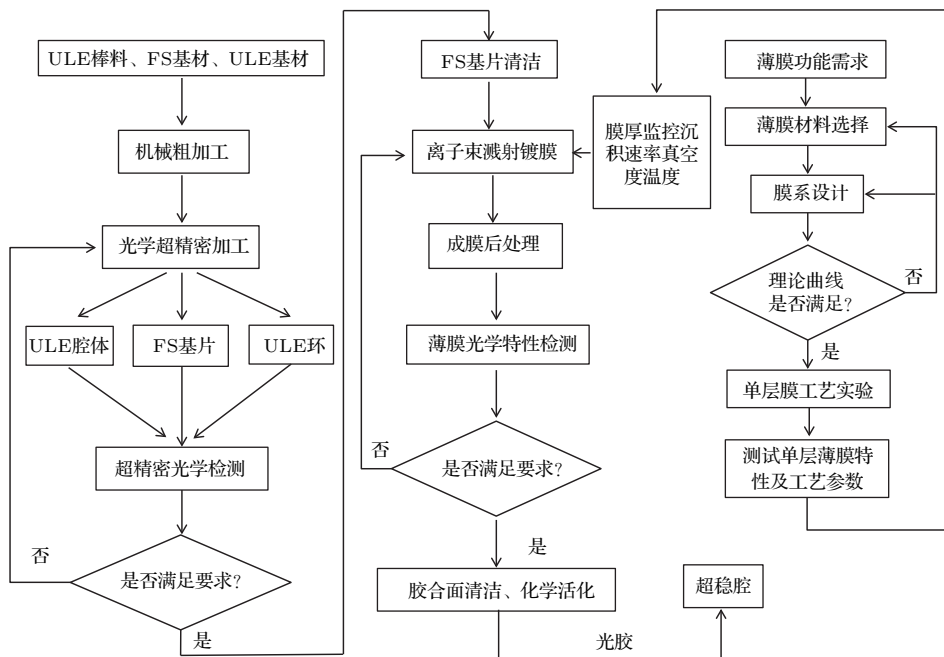


图3 超稳参考腔加工制造流程图
 Fig. 3. Flow chart of the ultra-stable reference cavity manufacture.

3.1 参考腔光学加工

球形超稳参考腔光学加工的核心是对腔体两光胶面的高平整度、表面超低粗糙度、光胶面对光轴的高垂直度、球形轮廓加工和腔镜基片表面高平整度、超低表面粗糙度、高面形控制及面间超高平行度加工. 如图4, 首先采用五轴数控中心多轴联动球面成型加工技术, 将ULE棒料加工成外形尺寸为 $S\phi 80$ mm的球形轮廓, 使用光学三坐标测量仪测量球形轮廓度优于0.02; 使用光胶耦合模具三级抛光技术, 实现光胶面高精度平面抛光加工, 利用Zygo白光干涉仪对腔体两个光胶端面的面形进行测量, 分别达到 $N_Q \leq 0.4$, $N_P \leq 0.2$; 利用光学影像测量仪测量两个光胶面间夹角和光胶面与光轴间的夹角, 两光胶端面楔角 $< 10''$, 腔体光胶端面与光轴的垂直度误差 $< 30''$. 使用DI原子力显微镜 (atomic force microscope, AFM) 分别测量其表面粗糙度 (rms) < 0.5 nm, 该AFM的分辨率为0.1 nm.

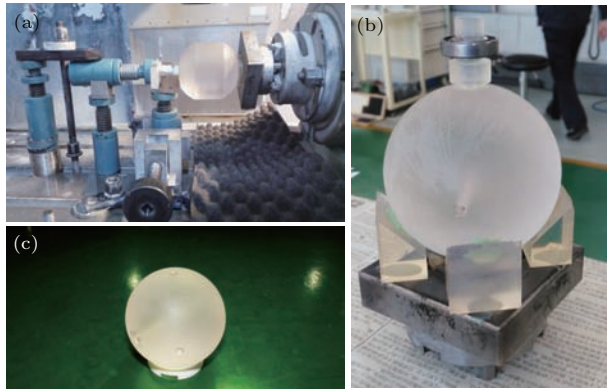


图4 自主研制球形超稳参考腔加工 (a) 正在机床上加工的ULE棒料; (b) 球形腔体在机床上夹持的辅助结构制备; (c) 光学加工完毕的球形腔体部分

Fig. 4. Self-reliance developed spherical ultra-stable reference cavity is machined optically: (a) ULE bar in the machine tool; (b) the preparation of the auxiliary structure of spherical cavity in the machine tool for processing; (c) the spherical cavity is finished by optical machining.

将FS基材加工成 $\phi 12.7$ mm反射镜基片. 采用超高光学表面质量三级抛光技术对每个反射镜基片的两个表面进行超精密抛光, 如图5(a), 使用AFM测量腔凹面反射镜基片表面粗糙度为 $R_q = 0.14$ nm (rms). 使用Zygo白光干涉仪测试反射镜基片面形 $N < 0.4$, 其中平面反射镜基片两个面之间楔角为 $5''$. 对两个ULE环的光胶表面进

行同样的超精密光学抛光作业, 其表面特性的测量结果与反射镜基片的相关测量结果相当.

3.2 腔镜基片镀膜

反射镜基片采用双面镀膜, 工作面镀制超高反射率薄膜, 基片背面镀制增透膜, 镀膜采用离子束溅射沉积镀膜技术 (IBS) [38,39]. 按照超稳腔对工作波长的反射率需求, 设计工作波长超高反射率薄膜的膜系结构为 $(HL)^{20}L$, 其中 H 代表高折射率材料 Ta_2O_5 , L 代表低折射率材料 SiO_2 , 膜层总数为41.

本文中, 首先采用化学清洗、超声波清洗和氮气氛围干燥相结合的办法对腔镜基片进行清洁. 采用双离子束溅射沉积工艺对 $\phi 12.7$ mm FS腔镜基片镀膜. 主离子束源为VEECO16 cm射频源, 辅助源为VEECO12 cm射频源, 主离子束轰击靶材, 溅射沉积到基底上形成薄膜, 辅助离子束对基底的表面进行预清洁和修整, 保证镀膜表面的清洁. 镀膜过程中采用Power-time方法[40]控制膜层的厚度, 控制精度达到0.2%. IBS技术成膜内应力较大, 并且镀膜过程中由于溅射原子质量差导致存在择优溅射现象[41], 因此镀膜结束后须在氧气氛围的高温环境中对其进行退火处理, 目的在于提高膜层物质的化学计量比和释放镀膜过程中在膜内形成的内应力, 从而减小膜层的吸收损耗. 退火后薄膜内部更加紧致、均匀, 降低了薄膜材料的机械损耗角[42], 从而提高了膜层的热稳定性, 这对减小最终超稳腔的热噪声极限是有意义的. 退火后的薄膜具有更佳的光学特性, 退火温度为 650 °C. 测量表明, 高折射率 Ta_2O_5 薄膜厚度为 1.66 μm , 低折射率 SiO_2 薄膜厚度为 2.48 μm , 超高反射率薄膜总厚度为 4.14 μm , 该膜层厚度与上述对参考腔热噪声极限要求的理论结果是一致的. Zygo白光干涉仪测量镀膜后反射镜面形 $N' < 0.2$, AFM测量薄膜表面的粗糙度 $R_c = 0.25$ nm (rms). 薄膜表面的粗糙度比基片表面的粗糙度高, 这是由于溅射原子的不均匀沉积形成的. 对比图5(a)和图5(b)可以观察到膜层表面的光滑度较基片差一些. 离子束溅射镀膜工艺过程中的核心控制量是沉积速率和薄膜厚度的精确控制, 前者关乎膜层质量优劣, 后者对膜系的光学特性有显著的影响[43,44].

将自主研制的腔镜插入一对已知标定反射率 $>99.999\%$ 、损耗 <1 ppm的标准凹面腔镜构成的Fabry-Perot腔, 采用连续光ringdown光谱法对薄

膜的反射率和损耗进行测试, 中心波长为 698 nm 的具体测试方法见本文第 4 部分的论述. 测量反射率时光束入射角度分别为 0° 和 45° , 如图 5(c), 曲线上平坦部分表示薄膜对该波段的入射光呈现高反射率特性, 45° 入射时, 反射中心波长较 0° 入射时向长波方向产生平移. 测量结果表明, 0° 入射时反射率 $R \geq 99.999\%$. 图 5(d) 表明, 与进口腔镜镀膜相比较, 反射率曲线平坦部分更低, 代表反

射率更高, 工作带宽比进口腔镜在短波方向拓展 50 nm 以上, 薄膜损耗 ≤ 4 ppm. 采用光热共路径干涉法 (photothermal common-path interferometry) [45] 测量薄膜的吸收损耗 ≤ 2 ppm, 该测量值高于 Precision Photonics 公司 1070 nm 薄膜的测试结果 [46], 这个差别来自基片表面和镀膜工艺的缺陷. 使用 Cary5000 分光光度计测试增透膜透过率 $T \geq 99.95\%$.

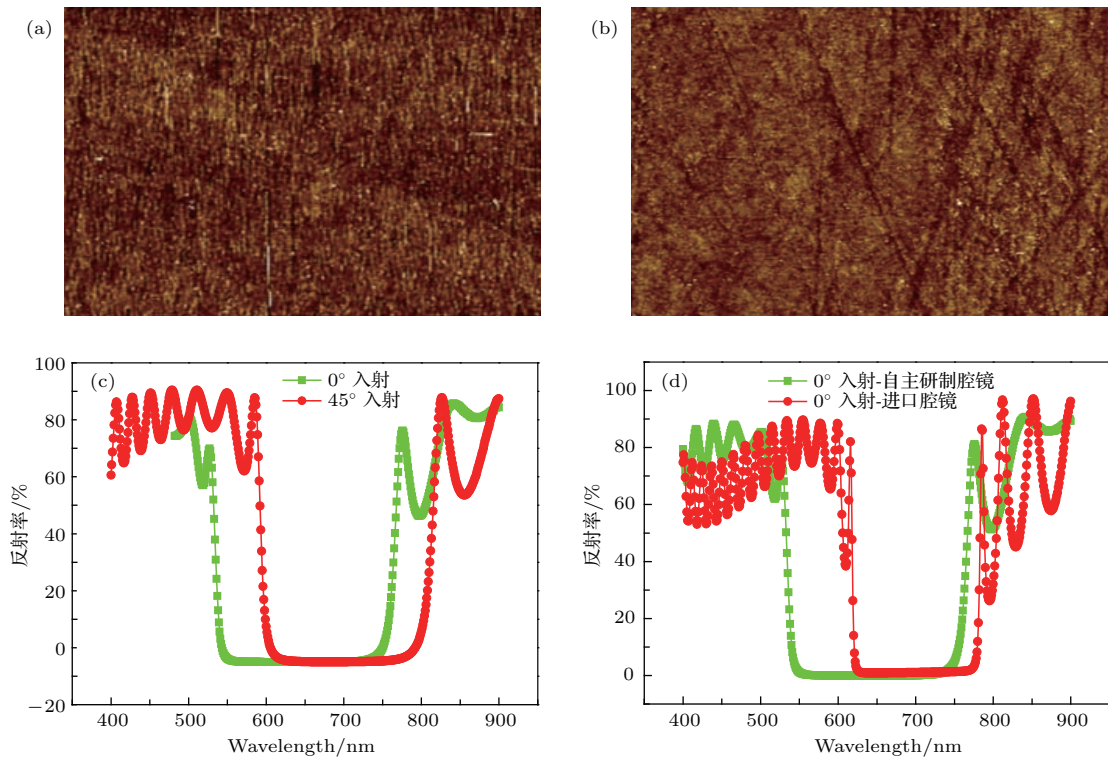


图 5 自主研制超稳参考腔反射镜基片表面和镀膜表面粗糙度测量及腔镜反射特性测量 (a) 腔镜基片表面粗糙度 AFM 图; (b) 腔镜镀膜表面粗糙度 AFM 图; (c) 分光光度计测量自主研制腔镜反射光谱特性曲线 (绿色方形点线代表 0° 入射, 红色圆形点线代表 45° 入射); (d) 0° 入射时, 分光光度计测量自主研制 (在线: 绿色方形点线) 和进口 (在线: 红色圆形点线) 腔镜的反射光谱特性曲线

Fig. 5. Measurements of the surface roughness for the mirror substrates and its coatings, and the reflection characteristics of the cavity mirrors developed independently: (a) AFM map of the surface roughness of the cavity mirror substrate; (b) AFM map of the coating surface roughness of the cavity mirror; (c) spectrophotometric measurements for the reflection spectra characteristics of the cavity mirror by developed independently (online: the green square point line for an incidence angle is 0° , and the red dot point line for an incidence angle is 45°); (d) spectrophotometric measurements for self-developed with 0 degrees incidence angle (online: green square point line) and imported (online: red dot line) mirror reflection spectral curves.

3.3 腔体、反射镜和 ULE 环光学胶合

经过光学超精密检测, 满足光学加工要求的腔体和镀膜特性需求的腔镜, 胶合后才可能构成超稳光学参考腔.

首先将检测后的腔体和腔镜及 ULE 环的光胶表面进行清洁, 此时胶合表面质量达 10^{-5} , 表面粗糙度已达到几埃或亚埃 (rms) 水平. 紧接着对胶合

表面进行化学活化处理, 以增加胶合面有效键合粒子的密度. 经过超精密抛光、清洁和表面化学活化处理后的两个超光滑平面紧密接触后, 接触表面部分分子之间的距离能够达到共价键作用的范围, 因此两胶合面在共价键和范德瓦尔斯力的共同作用下被牢固地键合在一起, 键合强度甚至可以超过基材的强度 [30], 从而将腔镜和腔体牢固地胶合到一起. 使用同样的工艺方法将两个 ULE 环胶合到两

个腔反射镜的外侧. 图 6(a) 为自主化研制的球形超稳腔.

4 参考腔测量结果与分析

由于腔体和腔镜光胶面的加工缺陷、光胶工艺过程中的公差控制及键合强度等因素的影响, 上述对独立腔体及腔镜反射率、损耗等特性的测量结果不能完全反映由它们所构成的超稳腔本身的相关特性, 因此需要对参考腔的光学特性进行测量评估. 通常使用线宽、精细度、腔损耗等物理量描述超稳光学参考腔的光学特性. 本文主要针对这几个量对自主研制的超稳参考腔进行测量. 图 6(b) 为自主研制球形超稳腔测试光路实物布局图.

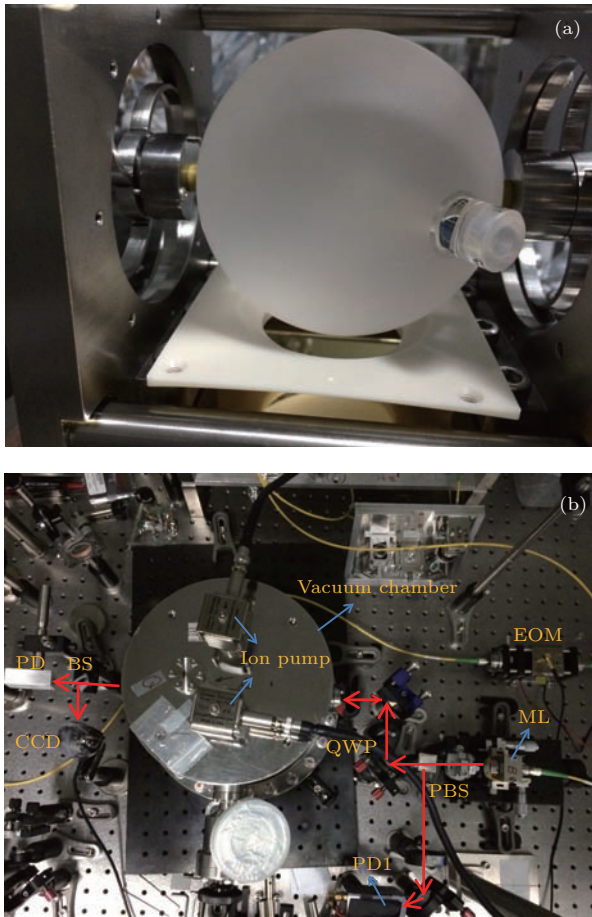


图 6 ULE 球形参考腔和实验测试光路 (a) ULE 球形参考腔; (b) 参考腔测试光路 (EOM, 电光相位调制器; ML, 模式匹配透镜组; PBS, 偏振分束镜; QWP, $\lambda/4$ 波片; PD, 快速光电探测器; BS, 分束器; CCD, CCD 相机)
 Fig. 6. ULE spherical optical reference cavity and test optical system: (a) ULE spherical optical reference cavity; (b) test optical system (EOM, electro optic modulator; ML, mode matching lens; PBS, polarization beam splitter; QWP, $\lambda/4$ wave plate; PD, photoelectric detector; BS, beam splitter; CCD, CCD camera).

4.1 两种方法测量球形超稳参考腔的精细度

目前, 国际上对超稳参考腔精细度的测量通常有两种办法, 一种被称为直接“扫腔线宽测量法”, 另一种被称为“腔衰荡测量法”.

4.1.1 扫腔线宽法测量超稳腔精细度

本文中, 将另一套基于 100 mm 进口柱形超稳腔 (C-CAV, 精细度约为 250000) 锁定的超窄线宽激光源 (拍频线宽 < 5 Hz) 利用声光调制器 AOM 实现 157 MHz 移频后, 通过 5 m 单模光纤馈送到自主研制球形超稳腔 (S-CAV), 测量原理如图 7(a) 所示. 使用 FFT 测量单模光纤相噪引起的激光线宽展宽为 0.4 Hz. 利用 EOM 对入射到球形参考腔的光束

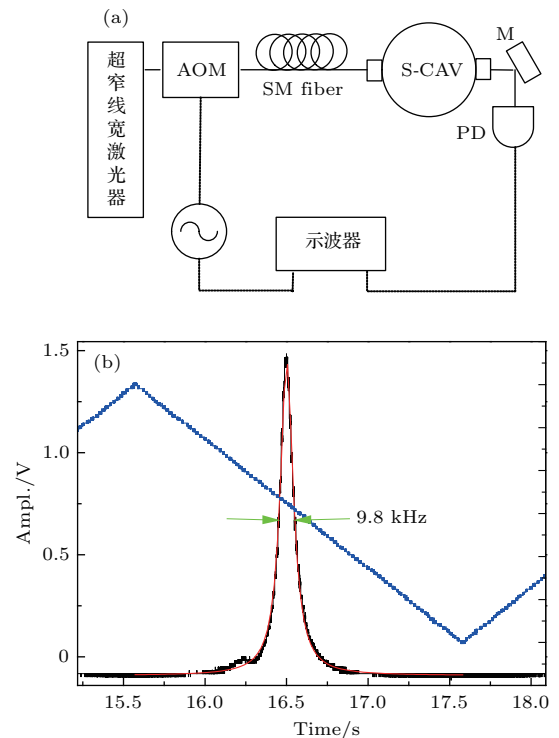


图 7 扫腔线宽法测量球形参考腔精细度 (a) 测量原理图 (AOM, 声光调制器; SM fiber, 单模光纤; M, 反射镜; 实线代表光学路径, 虚线为电信号通道, 下同); (b) 扫腔透射峰信号, 图中黑色线为腔透射信号, 蓝色线为三角波电压信号, 红色为拟合曲线
 Fig. 7. Measurement of the finesse to spherical cavity by scanning cavity line width: (a) Principle diagram of the measurement (AOM, acoustic optic modulator; SM fiber, single mode fiber; M, mirror; the solid line represents the optical path, and the dotted line is the signal channel); (b) cavity transmission peak signal by scanning cavity, the black line is the transmission signal of the cavity, the blue is the triangular wave voltage signal, and the red is fitting curve.

进行相位调制, 腔反射光束被高速光电探测器接收, 高速探测器输出的射频信号经过驱动 EOM 信号源的另一路本地信号解调获得误差信号, 该信号再经过一个一级 PI 放大电路将信号馈送到 AOM 驱动信号源对其进行反馈控制, 调节 AOM 的驱动信号频率, 使得 S-CAV 和 C-CAV 同时锁定, 并将 S-CAV 透射信号送入示波器观测. 开启 AOM 驱动信号三角波扫频功能, 扫描范围为 200 kHz, 记录存储数据. 如图 7(b), 使用 Lorenz 拟合对数据进行处理. 采用多次测量求取平均值的办法, 测得 S-CAV 的线宽为 (9800 ± 1.0) Hz. 根据参考腔的线宽和精细度 F 之间的关系式 (1) [47], 可以测得其精细度值.

$$F = \frac{\text{FSR}}{\Delta\nu}, \quad (1)$$

式中, FSR 为球形腔的自由光谱区, $\Delta\nu$ 为腔线宽. 自由光谱区由 $\text{FSR} = c/(2nL)$ 确定, c 为光速, 真空中折射率 $n = 1$, 腔长 $L = 78$ mm. 该球形参考腔的自由光谱范围 $\text{FSR} = 1.92$ GHz. 实验进行多组测量后取测量平均值. 扫腔线宽法测得该球形参考腔的精细度为 195000 ± 20 . 测量过程中, C-CAV 置于 0—100 Hz 隔离度 >20 dB 的商售主动隔震台上, S-CAV 直接置于光学平台上, 未对其进行隔震处理, 也没有对腔体进行控温处理, 只对其做真空处理 (真空度 5×10^{-5} Pa).

4.1.2 腔衰荡法测量超稳腔精细度

测量参考腔精细度的另一个方法是腔衰荡法, 测量原理如图 8(a) 所示. Toptica DL100 半导体激光源经过 AOM 移频, 再经过 EOM 进行相位调制后注入 S-CAV, 腔透射光和反射光在高速光电探测器 PD1 光敏面上外差拍频转换为光电信号, 该信号与经过适当相移的本地调制信号混频获得鉴频误差信号, 再经过低通滤波器 (LP) 后进入 PID 控制电路对激光源进行反馈控制, 此即 PDH 锁频技术 [7]. S-CAV 后高速光电探测器 PD2 与示波器相连接, 用以记录腔衰荡信号. 激光器锁定运行稳定后, 设置适当的单次触发电平, 使用 AOM 关闭入腔光束, 获得腔衰荡曲线, 对数据采用 e 指数拟合, 如图 8(b). 多次测量后取平均值, 测得腔内光子寿命为 $\tau_c = (15.8 \pm 0.4)$ μs .

由于存在腔损耗, 光场在两腔镜间来回反射的过程中, 光强随时间按照指数规律衰减, 测量依据如下理论公式 [47]:

$$F = 2\pi\tau_c\text{FSR}, \quad (2)$$

式中, τ_c 为腔内光子寿命, FSR 是球形腔的自由光谱区. 采用该方法测得的该球形参考腔精细度为 196000 ± 5100 , 该结果和通过扫腔线宽法测得精细度值很接近, 但由于腔透射光功率不够高, 使得腔衰荡曲线的信噪比不高, 因此精细度的测量误差比扫腔线宽法测量误差大.

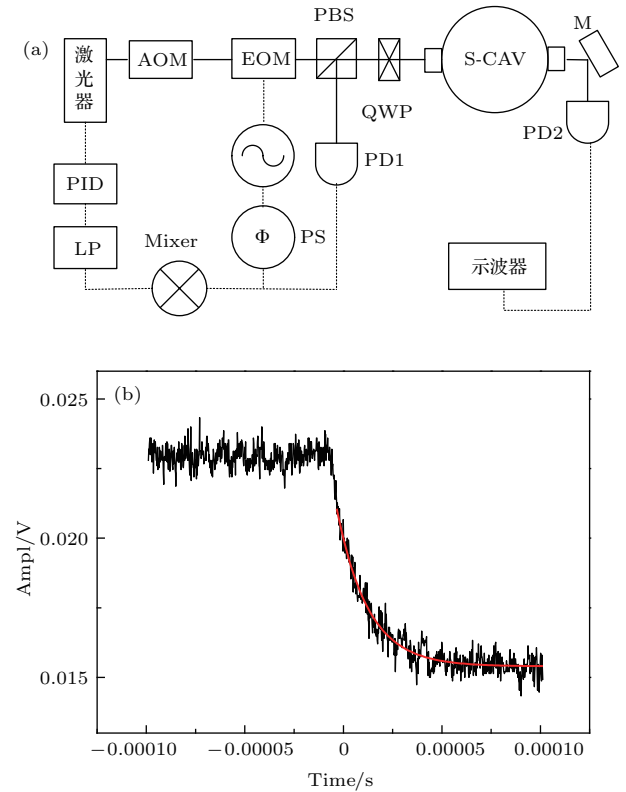


图 8 腔衰荡法测量球形超稳腔的精细度 (a) 测量原理图 (PS, 相移器; Mixer, 混频器; LP, 低通滤波); (b) 腔透射信号衰荡光谱曲线, 图中黑线为腔衰荡信号, 红线为拟合曲线

Fig. 8. Measurement of the finesse to the spherical ultra-stable cavity by cavity ring-down spectroscopy method: (a) Principle diagram of the measurement (PS, phase shifter; LP, low pass filter); (b) the ring-down spectrum curve of the cavity transmission signal, the black line in the figure is a cavity ring down signal and the red is the fitting curve.

根据扫腔线宽法的测量结果, 精细度约为 200000 的参考腔, 理论推算其腔内光子寿命约为十几 μs , 因此探测腔衰荡信号的光电探测器须具有足够高的光电响应速度, 以减小或消除其响应时延对测量结果造成的影响. 本文中腔衰荡信号探测器 PD2 响应时间为 0.1 μs , 远小于腔内光子寿命, 其响应引入的时延可忽略不计. 通常情况下, 自由运转时腔的透射信号很小, 同时 PD2 的探测灵敏度不高, 因此须将激光锁定到该球形参考腔上, 以获

得信噪比较高的透射信号进行测量. 由图 8(b) 可见, 腔衰荡信号的信噪比不是很高, 主要是由于锁定参数没有经过优化, 透射光功率不高导致的. 在入腔光功率一定的条件下, 通过改善锁定反馈控制参数通常可以获得最大的透射光信号.

腔内光子寿命和腔线宽之间存在简单关系 $\Delta\nu = 1/(2\pi\tau_c)$ [47,48], 根据腔衰荡测量的腔衰荡时间(光子寿命)计算得到腔线宽为 (10078 ± 249) Hz, 该值和通过直接扫腔线宽法测量的结果接近.

通过上述两种方法对该球形参考腔精细度的测量结果可以知道, 其精细度约为 195000.

实验上测得了参考腔的精细度后, 由此可以推算参考腔的反射率. 参考腔的精细度值代表着其分辨光谱的能力, 通常精细度越大, 其分辨光谱的能力就越强, 腔镜反射率也越高. 精细度 F 和腔镜反射率 R 之间存在如下关系 [31,49]:

$$F = \frac{\pi\sqrt{R}}{1-R}, \quad (3)$$

取球形参考腔的精细度 $F = 195000$, 依据上式算得腔镜反射率为 0.9999909, 该结果和对腔镜反射率的测量结果是一致的.

4.2 球形超稳参考腔损耗测量

参考腔的损耗是衡量其性能的另一个重要物理量, 测量依据理论公式 (4) 式和 (5) 式 [50].

$$F = \frac{\pi}{l+T}, \quad (4)$$

$$\frac{P_t}{P_r - P_i} = \frac{T^2 \left(\frac{F}{\pi}\right)^2}{l^2 \left(\frac{F}{\pi}\right)^2 - 1}, \quad (5)$$

式中, F 为参考腔的精细度值, l 为参考腔的总损耗, T 为腔透射率, P_i , P_r 和 P_t 分别为入腔、腔反射和腔透射光功率值. 通常自由运转情况下 P_t 很小, 不能准确测量, 因此须将激光器锁定到该球形参考腔上进行损耗测量, 测量原理同图 8(a). 锁定情况下, 不便于对 P_i 和 P_r 直接测量, 因此需借助光外差探测器 PD1 对它们进行定标测量.

这里假设两个腔镜的损耗和透射相等, 这样假设的一个依据是对同一个参考腔来说, 其腔镜材料和镀膜工艺相同. 由实验测得的参考腔精细度 F , P_i , P_r 和 P_t , 即可根据 (4) 式和 (5) 式计算得到腔的损耗和透射率.

测量过程中, 光功率值的测量不确定度小于 1%, 电压的测量不确定度小于 2%. 作为对照, 我们将实验室一个正在运行的窄线宽激光器系统上于 2012 年进口的 100 mm 参考腔的相关数据列入表 1 中.

表 1 进口 100 mm 参考腔和自主研制 78 mm 参考腔主要性能参数比较

Table 1. Comparison of the main performance parameters of imported 100 mm reference cavity and 78 mm reference cavity developed independently.

名称	精细度	反射率	线宽/kHz	损耗/ppm
进口腔	126000	0.999975	12.0	18.2
自主研制腔	195000	0.999991	9.8	3.7

5 结 论

设计了球形超稳腔的结构, 使用有限元法分析了该参考腔的力学支撑和约束方式的敏感性, 计算表明其最佳支撑位置点的震动敏感度小于 $1 \times 10^{-10}/g$. 完全依靠自主加工制造技术实现光学表面质量 10-5、表面粗糙度 <0.4 nm(rms) 光学加工. 采用双离子束溅射沉积镀膜工艺, 实现膜层厚控制精度为 0.2%、工作波长损耗 ≤ 4 ppm、反射率 $>99.999\%$ 超高反射率镀膜. 采用干式光胶技术键合腔体和腔镜. 采用扫腔线宽法和腔衰荡法测试了该球形参考腔的主要特征参数, 测试结果表明该腔的精细度约为 195000, 腔镜反射率大于 0.99999, 腔损耗小于 5 ppm. 这些测量结果与国际上同类型产品的性能指标相当, 腔损耗甚至更小. 后续将开展对该超稳腔的零膨胀系数工作点测量, 将该球形参考腔应用于空间窄线宽激光器原理样机系统, 全面评估其在实际工作环境中的震动敏感度、压窄激光线宽和稳定激光频率的能力等整体特性.

参考文献

- [1] Leibrandt D R, Thorpe M J, Notcutt M, Drullinger R E, Rosenband T, Bergquist J C 2011 *Opt. Express* **19** 3471
- [2] Kessler T, Hagemann C, Grebing C, Legero T, Steer U, Riehle F, Martin M J, Chen L, Ye J 2012 *Nat. Photonics* **6** 687
- [3] Swallows M D, Martin M J, Bishof M, Benko C, Lin Y, Blatt S, Rey A M, Ye J 2012 *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control* **59** 416

- [4] Cole G D, Zhang W, Martin M J, Ye J, Aspelmeyer M 2013 *Nat. Photon.* **7** 644
- [5] Hagemann C, Grebing C, Lisdat C, Falke S, Legero T, Sterr U, Riehle F, Martin M J, Ye J 2014 *Opt. Lett.* **39** 5102
- [6] Wu L, Jiang Y, Ma C, Qi W, Yu H, Bi Z, Ma L 2016 *Sci. Rep.* **6** 24969
- [7] Drever R W P, Hall J L, Kowalski F V, Hough J, Ford G M, Munley A J, Ward H 1983 *Appl. Phys. B* **31** 97
- [8] Chou C W, Hume D B, Koelemeij J C, Wineland D J, Rosenband T 2010 *Phys. Rev. Lett.* **104** 070802
- [9] Hinkley N, Sherman J A, Phillips N B, Schioppo M, Lemke N D, Beloy K, Pizzocaro M, Oates C W, Ludlow A D 2013 *Science* **341** 1215
- [10] Nicholson T L, Campbell S L, Hutson R B, Marti G E, Bloom B J, McNally R L, Zhang W, Barrett M D, Safronova M S, Strouse G F, Tew W L, Ye J 2015 *Nat. Commun.* **6** 6896
- [11] Heinecke D C, Bartels A, Diddams S A 2011 *Opt. Express* **19** 18440
- [12] Fortier T M, Kirchner M S, Quinlan F, Taylor J, Bergquist J C, Rosenband, Lemke T N, Ludlow A, Jiang Y, Oates C W, Diddams S A 2011 *Nat. Photonics* **5** 425
- [13] Hough J, Rowan S 2005 *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.* **7** 544
- [14] Willke B, Danzmann K, Frede M, King P, Kracht D, Kwee P, Puncken O, Savage R L, Schulz B, Seifert F, Veltkamp C, Wagner S, Weßels P, Winkelmann L 2008 *Classical Quantum Gravity* **25** 114040
- [15] Williams P A, Swann W C, Newbury N R 2008 *J. Opt. Soc. Am. B* **25** 1284
- [16] Kessler T, Hagemann C, Grebing G, Legero T, Sterr U, Riehle F, Martin M J, Chen L, Ye J 2012 *Nat. Photonics* **6** 687
- [17] Wu L, Jang Y, Ma C, Qi W, Yu H, Bi Z, Ma L 2016 *Sci. Rep.* **6** 24969
- [18] Levin Y 1998 *Phys. Rev. D* **57** 659
- [19] Numata K, Kemery A, Camp J 2004 *Phys. Rev. Lett.* **93** 250602
- [20] Nietzsche S, Nawrodt R, Zimmer A, Schnabel R, Vodel W, Seidel P 2006 *Supercond. Sci. Technol.* **19** 293
- [21] Notcutt M, Ma L S, Ye J, Hall J L 2005 *Opt. Lett.* **30** 1815
- [22] Ludlow A D, Huang X, Notcutt M, Zanon T, Foreman S M, Boyd M M, Blatt S, Ye J 2007 *Opt. Lett.* **32** 641
- [23] Nazarova T, Riehle F, Sterr U 2006 *Appl. Phys. B* **83** 531
- [24] Webster S A, Oxborrow M, Gill P 2007 *Phys. Rev. A* **75** 10064
- [25] Chen L S, Hall J L, Ye J, Yang T, Zang E, Li T C 2006 *Phys. Rev. A* **30** 150
- [26] Lyngnes O, Ode A, Ness D C 2009 *Proceedings of SPIE-The International Society* 7504
- [27] Traggis N G, Claussen N R, Wood C S, Lyngnes O <http://advancedthinfilms.com/> [2016-9-1]
- [28] Wood C, Carpenter D, Lyngnes O <http://advancedthinfilms.com/> [2016-9-1]
- [29] Carpenter D, Wood C, Lyngnes O, Traggis N <http://advancedthinfilms.com/> [2016-9-1]
- [30] Traggis N G, Claussen N R 2010 *tetitSPIE LASE* 7578
- [31] Darrow M C 2014 *Macalester Journal of Physics & Astronomy* **2** 3
- [32] Zalicki P, Zare R N 1995 *J. Chem. Phys.* **102** 2708
- [33] http://www.nas.gov/directorates/heo/scan/engineering/technology/txt_dsachtml <http://www.exphy.uni-duesseldorf.de/> [2016-9-1]
- [34] Webster S, Gill P 2011 *Opt. Lett.* **36** 3572
- [35] Schiller S, Gorlitz A, Nevsky A, Alighanbari S 2012 *Physics* **48** 412
- [36] Kessler T, Legero T, Sterr U 2012 *J. Opt. Soc. Am. B* **29** 178
- [37] Legero T, Kessler T, Sterr U 2010 *J. Opt. Soc. Am. B* **27** 776
- [38] Ong J L, Lucas L C, Lacefield W R, Rigney E D 1992 *Biomaterials* **13** 249
- [39] Wu J J, Wu C T, Liao Y C, Lu T R, Chen L C, Chen K H, Hwa L G, Kuo C T, Ling K J 1999 *Thin Solid Films* **s355** 417
- [40] Cormie P, McBride J M, McCauley G O 2009 *J. Strength Cond. Res.* **23** 177
- [41] Berg S, Katardjiev L 1999 *J. Vac. Sci. Technol. A* **17** 1916
- [42] Flaminio R, Franc J, Michel C, Morgado N, Pinard L, Sassolas B 2010 *Classical Quantum Gravity* **27** 84030
- [43] Buzea C, Robbie K 2005 *Rep. Prog. Phys.* **68** 385
- [44] Mitin V F, Lazarow V K, Lari L, Lytvyn P M, Kholevchuk V V, Matveeva L A, Mitin V V, Venger E F 2014 *Thin Solid Films* **550** 715
- [45] Alexandrovski A 2009 *Proceedings of SPIE-The International Society* **7193** 71930D-13
- [46] Lyngnes O, Traggis N, Wood C <http://advancedthinfilms.com/> [2016-9-1]
- [47] Lawrence M J, Willke B, Husman M E, Gustafson E K, Byer R L 1999 *J. Opt. Soc. Am. B* **16** 523
- [48] Foltynowicz A 2009 *Ph. D. Dissertation* (Umeå: Umeå University)
- [49] Hofstetter D, Thornton R L 1998 *IEEE J. Quantum Electron.* **34** 1914
- [50] Hood C J, Kimble H J, Ye J 2001 *Phys. Rev. A* **64** 33804

Self-reliance and independently developed high-finesse spherical ultrastable optical reference cavity*

Liu Jun¹⁾²⁾ Chen Bo-Xiong³⁾ Xu Guan-Jun²⁾ Cui Xiao-Xu³⁾ Bai Bo³⁾ Zhang Lin-Bo²⁾
 Chen Long²⁾ Jiao Dong-Dong²⁾ Wang Tao³⁾ Liu Tao^{2)†}
 Dong Rui-Fang²⁾ Zhang Shou-Gang²⁾

1) (University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

2) (National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, Time and Frequency Standard Laboratory, Xi'an 710600, China)

3) (Avic Xi'an Fight Automatic Control Research Institute, Xi'an 710065, China)

(Received 29 September 2016; revised manuscript received 18 January 2017)

Abstract

Ultra-stable reference cavity with high finesse is a crucial component in a narrow-linewidth laser system which is widely used in time and frequency metrology, the test of Lorentz invariance, and measure of gravitational wave. In this paper, we report the recent progress of the self-made spherical reference cavity, aiming at the future space application. The main function of cavity is the reference of ultra-stable laser, which is the local reference oscillation source of space optical clock.

The diameter of the designed spherical cavity spacer made of ultra-low expansion glass is 80 mm, and the cavity length is 78 mm, flat-concave mirrors configuration, and the radius of the concave mirror is 0.5 m. The support structure is designed to have two 3.9 mm-radius spherical grooves located at the poles of the sphere along the diameter direction (defined as support axis), and a 53 angle between the support axis and the optical axis. The mechanic vibration sensitivities of the cavity along and perpendicular to the optical axis are both calculated by finite element analysis method to be below $1 \times 10^{-10}/g$. Five-axis linkage CNC machining sphere forming technology is applied to S ϕ 80 mm spherical surface processing with spherical contour degree up to 0.02. After a three-stage surface polishing processes, the fused silicamirror substratessurface roughness is measured to be less than 0.2 nm (rms). Implementing double ion beam sputtering technique for mirror coating, the reflection of the coating achieves a reflectivity of >99.999% and a loss of <4 ppm for 698 nm laser. The coating surface roughness is measured to be < 0.3 nm (rms). The cavity spacer and the mirror are bonded by dried optical contact. In order to improve the thermal noise characteristics of the cavity, an ultra low expansion ring is contacted optically to the outer surface of the mirror.

The cavity is characterized by ring-down spectroscopy, and the finesse is around 195000. With the help of a home-made 698 nm ultra narrow line-width laser, the cavity line-width is measured to be 9.8 kHz by sweeping cavity method. A 698 nm semiconductor laser is locked to this spherical cavity by PDH technology, and the cavity loss is measured to be <5 ppm.

Keywords: ultra-stable cavity, ultra low expansion, finesse, optical clock

PACS: 06.20.F-, 42.79.Wc, 62.25.Jk, 78.20.Jq

DOI: 10.7498/aps.66.080601

* Project supported by the Special Fund for Research on National Major Research Instruments and Facilities of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61127901), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11273024, 61025023), and the Young Scientists Fund of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11403031).

† Corresponding author. E-mail: taoliu@ntsc.ac.cn