



·强激光物理与技术·

2.7~3.0 μm 波段高反镜反射率测量研究*

周文超^{1,2}, 魏千馨³, 彭 琛², 黄德权², 朱日宏¹

(1. 南京理工大学 电子工程与光电技术学院, 南京 210094; 2. 中国工程物理研究院 应用电子学研究所, 四川 绵阳 621900;

3. 电子科技大学 光电科学与工程学院, 成都 610054)

摘 要: 中红外激光领域广泛使用高性能高反射光学元件, 高反射率高精度测试技术是制备高性能反射光学元件的基础。针对 2.7~3.0 μm 波段光学元件高反射率测量的实际需求, 基于量子级联激光器建立了连续光腔衰荡反射率测试实验装置, 通过优选 2.7~3.0 μm 波段反射带内水汽吸收较弱的测试波长, 分析空气中水汽吸收对衰荡时间和反射率测量的影响, 并比较空气和氮气环境下反射率测量结果, 实现了 2.7~3.0 μm 波段高反镜反射率的准确测量, 在反射率约 99.95% 时绝对测量精度优于 2×10^{-5} 。实验结果显示, 采用测试波长 2.9 μm 并在测量时保证初始腔和测试腔腔长相同, 无需使用氮气环境, 直接在实验室空气环境可实现高反射率的精确测量。

关键词: 中红外; 高反镜; 反射率; 光腔衰荡; 水汽吸收

中图分类号: TN247

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202436.240014

Reflectivity measurement of highly reflective mirrors at spectral band of 2.7–3.0 μm

Zhou Wenchao^{1,2}, Wei Qianhe³, Peng Chen², Huang Dequan², Zhu Rihong¹

(1. School of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China;

2. Institute of Applied Electronics, CAEP, Mianyang 621900, China;

3. School of Optoelectronic Science and Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

Abstract: The highly reflective (HR) mirrors with high-performance are widely employed in mid-infrared (mid-IR) laser systems. The manufacturing of mid-IR HR mirrors with high reflectivity requires techniques to precisely measure their high reflectivity. In this paper, a continuous-wave cavity ring-down (CRD) experimental apparatus in the 2.7–3.0 μm spectral range is established based on a quantum-cascade laser for high reflectivity measurement. By precisely optimizing the laser wavelength within the reflection band of the mid-IR HR mirrors, analyzing the influence of water vapor absorption on the ring-down time and reflectivity measurements, and comparing the reflectivity results measured under ambient air in clean-room laboratory and under nitrogen purging, the accurate measurement of high reflectivity is achieved at the 2.7–3.0 μm spectral band with an absolute reflectivity measurement accuracy of below 2×10^{-5} for about 99.95% reflectivity. The experimental results demonstrate that by setting the laser wavelength precisely to 2.9 μm and employing equal lengths of initial and test ring-down cavities (RDC) to avoid the influence of water vapor's absorption lines, the reflectivity measurement for the 2.7–3.0 μm spectral band can be performed under normal clean-room laboratory air, without the need of nitrogen purging.

Key words: mid-infrared, highly reflective mirror, reflectivity, cavity ring-down, absorption of water vapor

随着激光技术的发展, 中红外激光光源^[1](包括量子级联激光器^[2]、固体激光器^[3]、光纤激光器^[4]和气体激光器^[5-6]等)快速发展, 输出功率/能量不断提高, 目前已被广泛应用于生物医学^[7]、痕量气体探测^[8]、遥感遥测^[9]等领域, 在国防安全领域也具有重要应用前景^[10]。在中红外激光系统中, 大量使用低光学损耗、高反射率的反射光学元件^[11-12]。这些反射光学元件在制备和使用过程中会不同程度地吸附一定量的水汽^[13-14]。在 2.7~3.0 μm 波段, 由于水汽存在大量的吸收谱线^[15], 导致高反射光学元件的吸收损耗增加, 从而降低高反镜的反射率。通过优化镀膜工艺参数可以提高高反镜的反射率, 但首先必须要有准确测量反射率的技术手段。

* 收稿日期: 2023-12-10; 修订日期: 2024-01-12
联系方式: 周文超, zwc0710@126.com。

目前,准确测量高反射率($\geq 99.7\%$)主要采用光腔衰荡法^[16-17]。光腔衰荡法是反射光学元件高反射率测量方法的国际标准^[18],无需标定可直接测量反射率绝对值,适用于高于 99.5% 反射率的测量,测量不确定度远小于分光光度法(典型测量不确定度 $\pm 0.3\%$),且反射率越高,测量准确度越高,报道的最高反射率绝对测量不确定度优于 2×10^{-7} ^[19]。然而,在 2.7~3.0 μm 波段,由于空气中的水汽吸收影响反射率测量结果的准确性,高反镜反射率测量必须考虑空气中水汽吸收影响并在必要时予以扣除,国内外尚无 2.7~3.0 μm 波段高反射率光腔衰荡测量研究的报道。本文针对 2.7~3.0 μm 波段高反镜反射率测试的实际需求,通过优化探测激光器波长,分析空气中水汽吸收对反射率测量的影响,并比较空气和氮气环境下反射率测量结果,实现了 2.7~3.0 μm 波段高反镜反射率的准确测量,在反射率约 99.95% 时绝对测量精度优于 2×10^{-5} 。

1 理 论

1.1 光腔衰荡高反射率测量的基本原理

光腔衰荡测量高反射率的基本原理为:当一束激光耦合进入由两块或以上高反射腔镜构成的稳定光学谐振腔,进入光学谐振腔(即衰荡光腔)的激光束在腔内来回反射,通过声光调制器关断激光束后,由于腔内光学损耗(包括腔镜反射损耗和腔内吸收损耗)的存在,光腔输出的激光能量随时间呈指数衰减,其衰荡时间定义为出射激光光强衰减为初始光强的 1/e 时经过的时间,其值由腔镜的反射率、腔长和腔内吸收损耗决定。如果腔内吸收介质遵循 Beer 定律,则衰荡光腔出射光强的衰减特性可表达为

$$I(t) = I_1 \exp(-t/\tau_0) \quad (1)$$

式中: I_1 为关断激光束初始时刻($t=0$)透射出衰荡光腔的光强, τ_0 为衰荡时间。对于一个由两块高反射腔镜构成的稳定光学谐振腔,衰荡时间与腔镜反射率、腔长及腔内损耗的关系为

$$\tau_0 = \frac{L}{c(\alpha L - \ln \sqrt{R_1 R_2})} \quad (2)$$

式中: L 为衰荡腔腔长, c 为光速, α 为腔内损耗系数(例如,空气在测试波长的吸收系数), R_1 、 R_2 分别为衰荡光腔两腔镜的反射率。未插入被测反射光学元件的衰荡光腔称为初始腔,衰荡时间 τ_0 称为初始腔衰荡时间。当按被测反射光学元件的使用角度插入被测反射元件并按要求移动后腔镜位置并形成稳定光学谐振腔后,构成的衰荡光腔则称为测试腔,衰荡时间 τ_1 称为测试腔衰荡时间。在测试腔腔长与初始腔腔长相等的条件下,测试腔衰荡时间与腔镜反射率和被测元件反射率 R 的关系为

$$\tau_1 = \frac{L}{c(\alpha L - \ln R \sqrt{R_1 R_2})} \quad (3)$$

比较公式(2)和(3),得到待测反射光学元件反射率为

$$R = \exp(L/c\tau_0 - L/c\tau_1) \quad (4)$$

由公式(4)可以看出,理论上在初始腔和测试腔腔长相同的条件下,空气吸收损耗对反射率测量没有影响。但在实际测量中,空气损耗系数通过影响初始腔和测试腔衰荡时间的测量,从而影响反射率测量结果,并且在初始腔和测试腔腔长不完全相同时直接引入反射率测量误差

$$R = \exp(L_0/c\tau_0 - L_1/c\tau_1) - \alpha(L_1 - L_0) \quad (5)$$

式中: L_0 和 L_1 分别表示初始腔和测试腔的腔长。从公式(5)可以看出,可以通过选择测试波长降低吸收系数 α ,同时减小初始腔和测试腔腔长差,可减小空气吸收对反射率测量结果的影响。

1.2 测试波长选择

2.7~3.0 μm 波段高反镜的反射带宽一般超过 0.5 μm ,因此为了降低空气中水汽吸收对反射率测量的影响,实际测量可选择水汽吸收弱的激光波长。图 1(a)所示为通过 HITRAN 数据库^[13]计算的空气中水汽在常温常压下 2.7~3.0 μm 波段的吸收谱线分布。从图中可以看出,水汽在短波长端(2.7~2.8 μm)存在大量的强吸收谱线,最高吸收截面超过 $7 \times 10^{-19} \text{ cm}^2/\text{molecule}$,但在长波长端(2.9~3.0 μm)吸收谱线密度和强度明显减弱,谱线强度降至 $1 \times 10^{-20} \text{ cm}^2/\text{molecule}$ 量级及以下,因此测试波长应选择在长波长端,同时考虑到测试波长应尽量靠近高反镜反射谱带的中心波长位置,因此在实际测量中,可选择反射率测试波长在 2.9 μm 附近,但应尽量避免水汽的吸收谱线位置进行反射率测量。图 1(b)所示为水汽在 2.90~2.92 μm 波段的吸收谱线图。可以看出,在 2.9 μm 波长,水汽的吸

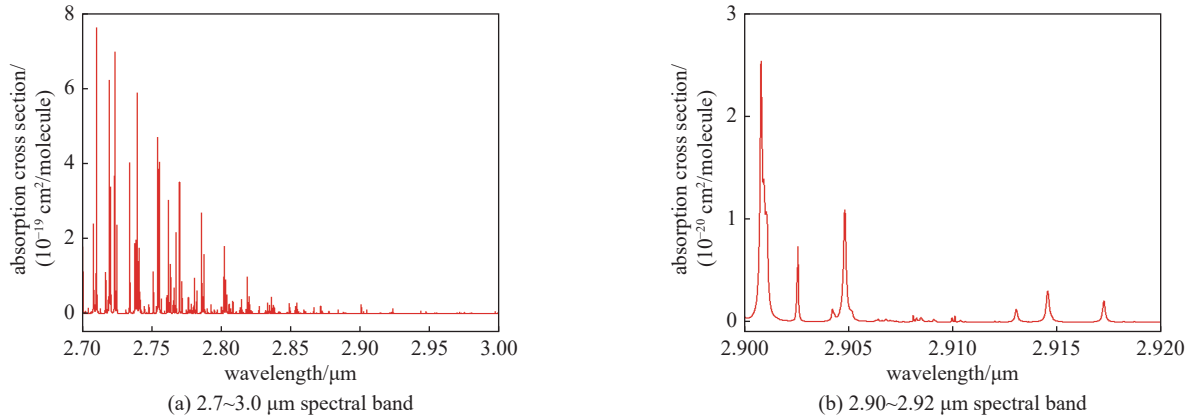


Fig. 1 Absorption spectrum of water vapor in air at 296 K temperature and 0.1 MPa pressure

图 1 常温常压下空气中水汽的吸收谱线图

收最低, 因此选择此波长为反射率测试波长, 最大限度降低空气中水汽吸收对反射率测量的影响。需要说明的是, 即使在 2.9 μm 波长, 其吸收截面仍达到 $1.2 \times 10^{-23} \text{ cm}^2/\text{molecule}$, 在空气相对湿度 50% 时的吸收系数约为 $1 \times 10^{-5} \text{ cm}^{-1}$, 当反射率较高时其对测量结果的影响仍不可忽略, 需要加以考虑和消除。消除水汽吸收影响的主要考虑是反射率测量时保持初始光腔和测试光腔采用相同的光腔腔长。

2 实验

2.1 实验装置

根据在 2.7~3.0 μm 波段可得到的激光器类型和功率, 光腔衰荡反射率测量装置采用选用基于窄线宽连续激光光源的连续波光腔衰荡反射率测量技术, 实验装置如图 2 所示。激光光源采用窄线宽量子级联激光器(QCL), 通过控制激光器工作温度将输出波长调谐到 2.9 μm, 激光器线宽约 3 MHz、输出功率 10.5 mW、TEM₀₀ 基模输出。激光束通过光隔离器和声光调制器后进入由两块相同平凹反射镜构成的衰荡腔(初始腔)内, 从后腔镜透射的光束经透镜聚焦后由光电探测器(高速红外光电探测器, 响应波长范围: 2~3.4 μm, 在 2.9 μm 波段的响应度大于 $7 \times 10^{11} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1/2}$)探测。当光电探测器信号强度达到设定阈值时, 由阈值触发电路控制声光调制器关断激光光路, 形成光腔衰荡信号, 由示波器采集传输至计算机, 通过单指数函数拟合得到初始腔衰荡时间。实验中使用红光激光作为指示光进行光路调节。在初始腔测量基础上, 按照其使用角度要求插入被测反射光学元件构成三镜折叠型测试腔, 相应地调整后腔镜位置重新构成稳定的光学谐振腔, 重复上述步骤测量测试腔衰荡时间, 并按照公式(4)计算得到待测高反镜反射率 R_x 。为了分析空气中水汽吸收对反射率测量的影响, 衰荡光腔放置于可充高纯氮气的箱体中, 充入氮气流速由流量计控制, 由放置于实验平台上的温湿度计记录实验室环境温湿度。由于受箱体体积的限制(箱体长宽高为 30 cm×27 cm×19 cm, 壁厚 2 cm, 腔内体积约 $1 \times 10^4 \text{ cm}^3$), 初始腔腔长设置为 0.19 m, 测试腔腔长调节范围为 0.19~0.27 m。另外, 还进行了实验室空气环境下的反射率测量实验, 在空气环境实验时将箱体拆除使得测量光路暴露在空气环境中, 测量时初始腔和测试腔腔长保持相同并同步改变, 腔长调节范围为 0.19~0.45 m。

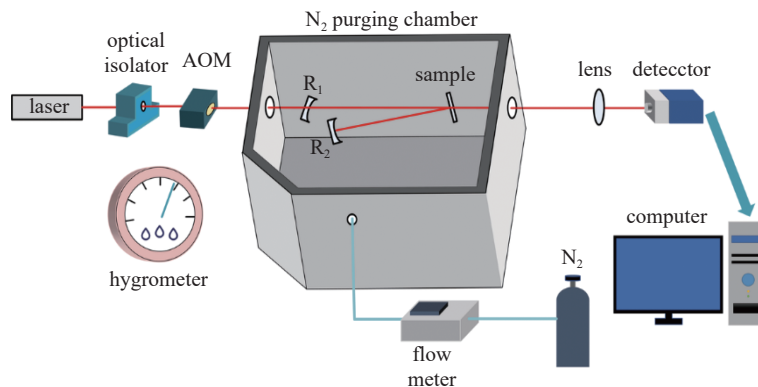


Fig. 2 Schematic diagram of experimental setup for high reflectivity measurement at 2.9 μm. AOM: Acoustic-Optic Modulator

图 2 实验装置图。AOM: 声光调制器

实验中采用的被测高反镜样品为中心波长 $2.94 \mu\text{m}$ 的平面高反射光学元件, 使用入射角度为 0° , 标称反射率大于 99.8%, 测量时入射角为 10° 左右。

2.2 实验结果

实验在千级超净实验室进行, 环境温度 17°C , 相对湿度 50%。首先记录了在 $2.9 \mu\text{m}$ 波长的典型光腔衰荡信号并进行了单指数拟合, 如图 3 所示。图中光腔衰荡信号曲线是 16 次信号的平均。可以看出, 测量的光腔衰荡信号满足单指数衰减特征, 通过曲线拟合可以获得准确的衰荡时间值。

为了对比空气中水汽吸收对衰荡时间测量的影响, 记录了在充氮气过程中衰荡时间的实时变化, 如图 4 所示。图 4 是腔长 19 cm 时初始腔和测试腔衰荡时间的实时变化曲线, 测量时氮气流速为 10 L/min 。充气开始时由于箱体內的空气被氮气逐渐替代, 衰荡腔内水汽含量降低, 衰荡时间上升, 并在 30 min 左右饱和, 说明箱体中的空气被氮气替代, 箱体内水汽对衰荡时间测量的影响变得可以近似忽略。初始腔衰荡时间在充氮气前为 $0.892 \mu\text{s}$, 充氮气后变为 $0.977 \mu\text{s}$; 相应地, 测试腔衰荡时间在充氮气前后为 $0.526 \mu\text{s}$, 充氮气后变为 $0.561 \mu\text{s}$, 测量结果充分显示空气中水汽对衰荡时间测量产生显著影响, 必须加以考虑。

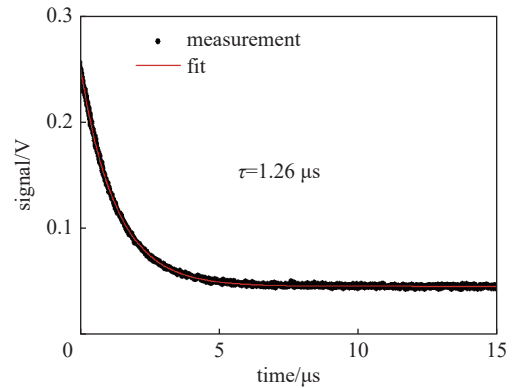


Fig. 3 A typical cavity ring-down signal and the corresponding single-exponential fit measured at $2.9 \mu\text{m}$

图 3 典型光腔衰荡信号及其单指数拟合曲线

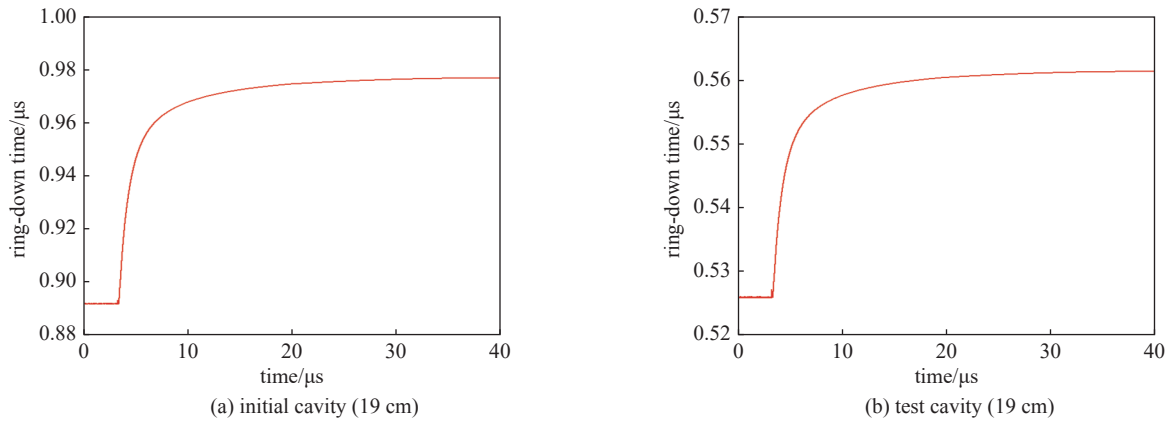


Fig. 4 Ring-down time evolution measured during N_2 purging

图 4 充氮气过程中衰荡时间的实时变化

进一步在实验室空气环境下测量了不同腔长时初始腔衰荡时间, 并按公式(2)计算了腔镜的表观反射率值与腔长的关系, 如图 5 所示。从图中可以看出, 由于空气中水汽吸收损耗的影响, 表观反射率随腔长增加近似线性降低, 线性拟合线的斜率为 $8.28 \times 10^{-6} \text{ cm}^{-1}$, 即为腔内空气在 $2.9 \mu\text{m}$ 波长的光学损耗系数^[20], 与实验室空气中水汽的吸收系数基本一致。而线性拟合线与 Y 轴的截距为 99.9444%, 理论上为两腔镜的平均反射率。而根据图 4(a) 中充氮气达到饱和后的衰荡时间计算得到的腔镜平均反射率为 99.9352%, 与截距反射率的差别为 0.0092%。原因可能是充氮气的箱体中还存在一定的残余空气。另一方面, 如此小的差别也验证了测量结果的正确性。

为了进一步分析高反镜反射率测量中空气中水汽的影响, 以解决实际反射率测量中衰荡腔内是否需要充氮气的疑问, 分别在实验室空气环境和充氮气环境下测量了 0° 入射高反镜的反射率(在 10° 左右测量), 并测量了不同腔长时高反镜反射率, 以验证测量结果的准确性^[18]。在空气环境中测量时, 初始腔和测试腔同步改变腔长, 以控制测量误差。在每一个腔长分别测量初始腔和测试腔的衰荡时间, 并根据公式(4)计算高反镜的反射率, 测量结果如图 6 所示。图 6 中的“●”点为空气环境中不同腔长的反射率测量结果, 腔长变化范围为 $0.19 \sim 0.45 \text{ m}$ 。结果显示反射率测量结果与腔长近似无关, 7 个不同腔长测量的高反镜反射率的统计平均值为 99.9502%, 标准偏差为 0.0013%; 而在氮气环境中测量时, 只在一个腔长测量初始腔衰荡时间, 仅改变测试腔腔长并测量不同腔长时的测试腔衰荡时间, 根据公式(5)并假设腔内气体吸收系数 $\alpha=0$ (空气被氮气完全置换)计算被测高反镜的反射率。图 6 中的“■”点为氮气环境中不同测试腔腔长的反射率测量结果, 测试腔腔长变化范围为 $0.19 \sim 0.27 \text{ m}$ (受箱体内体积的限

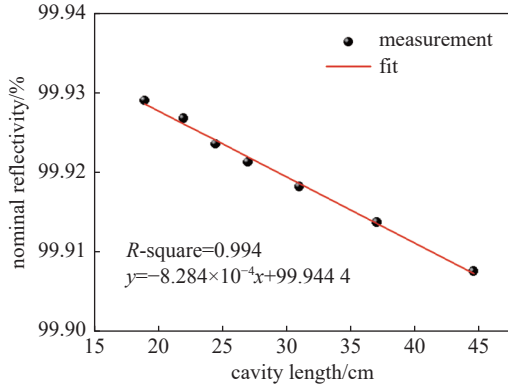


Fig. 5 Average nominal reflectivity of the cavity mirrors measured versus the cavity length of the initial cavity

图5 腔镜表观反射率与初始腔腔长的关系

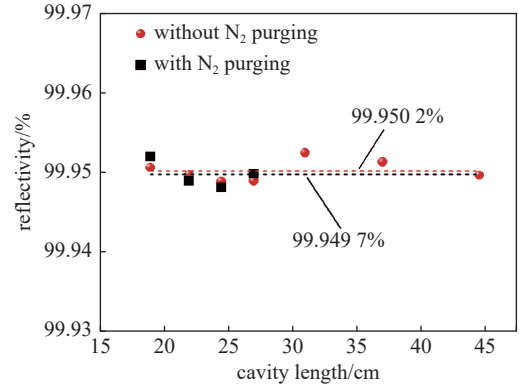


Fig. 6 Reflectivity measurement of a highly reflective mirror at different cavity lengths with and without N₂ purging

图6 空气和氮气环境下测量的高反镜反射率与腔长的关系

制)。同样, 反射率测量值与腔长近似无关, 4 个不同测试腔腔长测量的高反镜反射率的统计平均值为 99.9497%, 标准偏差为 0.0017%。

测试结果表明: (1) 在空气环境中测量时如果能保持初始腔腔长和测试腔腔长相同, 则空气中水汽吸收对反射率测量的影响可以忽略; (2) 在氮气环境中测量时即使初始腔腔长和测试腔腔长不同, 仍然能获得准确的反射率测量结果; (3) 氮气环境中高反镜反射率测量结果略低于空气环境中测量结果 (99.9497% vs 99.9502%) 说明氮气环境中可能还残留少许水汽, 空气置换不完全, 与图 5 腔镜反射率测量结果一致; (4) 空气和氮气环境中高反镜反射率测量结果的高度一致性 (99.9502% vs 99.9497%, 偏差仅为 5×10^{-6})、测量反射率值与腔长的无关特性证明了反射率测量结果的准确性。

2.3 分析讨论

由于光腔衰荡反射率测量是一种绝对测量方法, 图 6 显示的测量结果即为被测高反镜的绝对反射率值, 不同腔长反射率测量结果的一致也验证了结果的可靠性, 而每个腔长测量结果的高重复性 (30 次重复测量的反射率重复性测量误差低于 1×10^{-6}) 也证明了实验装置的稳定性。但不同腔长反射率测量结果的统计标准偏差 (空气环境测量时 0.0013%、氮气环境测量时 0.0017%) 也说明测量结果还存在一定的误差。根据公式 (4), 高反镜反射率测量误差可表示为

$$|\Delta R_x / R_x| = (1 - R)(|\Delta L / L| + |\Delta \tau_0 / \tau_0|) + (1 - RR_x)(|\Delta L / L| + |\Delta \tau_1 / \tau_1|) \quad (6)$$

式中: R 为腔镜平均反射率, $|\Delta L / L|$, $|\Delta \tau_0 / \tau_0|$ 和 $|\Delta \tau_1 / \tau_1|$ 分别表示腔长、初始腔衰荡时间和测试腔衰荡时间的测量误差。实验中腔长采用卷尺测量, 测量误差约 ± 0.1 cm, 衰荡时间采用数字示波器记录, 测量误差低于 ± 0.01 μs, 在 $R \approx 99.94\%$ 、 $R_x \approx 99.95\%$ 时, 估计 R_x 测量误差为 $(1 \sim 2) \times 10^{-5}$, 与实验结果基本一致。另外, 当衰荡腔内空气存在吸收损耗时, 由 (5) 式在腔长测量存在误差时空气吸收导致的反射率绝对误差为 $\alpha \Delta L$, ΔL 为腔长测量绝对误差。由于优选测试波长, 在腔长测量误差约 ± 0.1 cm 时, 由于空气中水汽吸收导致的反射率测量误差低于 $\pm 1 \times 10^{-6}$, 可以忽略。从公式 (6) 可以看出, 增加腔长可以提高反射率测量精度。在实际测量中, 可适当采用更长的腔长, 以进一步提高反射率测量精度。

实验结果也证明当采用 2.9 μm 测试波长时, 反射率测量可以直接在空气环境中进行, 无需充氮气 (充氮气不仅需要密闭箱体和高纯氮气, 增加装置成本, 而且测量时间变长, 导致测量效率降低)。这是因为水汽在 2.9 μm 波长处的吸收截面仅为约 1.2×10^{-23} cm²/molecule, 50% 相对湿度空气环境中水汽的吸收系数约 8×10^{-6} cm⁻¹。但水汽在 2.7~3.0 μm 波段存在大量吸收谱线, 因此必须精确控制测量波长以避免在水汽吸收峰位置测量反射率。例如, 假如测量波长仅偏离 0.01 μm, 则水汽吸收截面变为约 8×10^{-22} cm²/molecule, 增强了超过 60 倍, 在腔长测量误差 ± 0.1 cm 时空气中水汽吸收导致的反射率测量误差变得高于 5×10^{-5} , 则需要采用充氮气环境消除水汽吸收对反射率测量结果的影响。因此在实际的反射率测量装置中建议采用输出波长可调谐的窄线宽 QCL 做为测试光源, 并将激光波长调谐至最优测试波长, 或者至少选择水汽吸收截面小于 1×10^{-22} cm²/molecule 的激光波长, 这样保证由于腔长测量误差 (± 0.1 cm) 引起的反射率测量误差低于 1×10^{-5} 。通过优选激光波长降低空气中水汽吸收对反射率测量精度影响的技术思路实现了在常规空气环境 2.7~3.0 μm 波段高反镜反射率准确测量, 该技术路线简单易行, 可操作性

强, 具有高的工程应用价值。

值得一提的是: 高精度的高反射率测试手段是提高中红外波段高反镜反射率、降低其吸收损耗的基础, 可用于优化镀膜工艺甚至采用全新的镀膜技术^[21] 以提高中红外波段高反镜的性能, 高精度高反射率测试平台对大量使用的高反镜性能优化尤为重要。

3 结 论

本文在 2.7~3.0 μm 波段建立了连续波光腔衰荡高反射率测量装置, 分析了空气中水汽在该波段的吸收特性以及对光腔衰荡反射率测量的影响, 通过优选测试波长降低衰荡光腔内水汽吸收谱线强度并采用初始腔和测试腔等腔长的测量构型, 在常规超净室空气环境中实现了该波段高反射率的准确测量, 反射率测量绝对精度优于 2×10^{-5} , 可望满足该波段高反镜反射率的测试需求, 为该波段高性能反射光学元件的制备奠定了测试基础。由于大气中水汽在整个中长波红外波段具有丰富的吸收谱线, 本论文的优选激光波长并采用等腔长测量构型研究思路对其他红外波段的高反镜反射率测量研究有重要的参考价值。

参考文献:

- [1] 程乃俊, 李惟帆, 祁峰. 中红外激光器研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60: 1700006. (Cheng Naijun, Li Weifan, Qi Feng. Progress of mid-infrared laser[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2023, 60: 1700006)
- [2] Vitiello M S, Scaliari G, Williams B, et al. Quantum cascade lasers: 20 years of challenges[J]. *Optics Express*, 2015, 23(4): 5167-5182.
- [3] Quan C, Sun D L, Zhang H L, et al. 13-W and 1000-Hz of a 2.7- μm laser on the 968 nm LD side-pumped Er: YAP crystal with concave end-faces[J]. *Optics Express*, 2021, 29(14): 21655-21663.
- [4] Chen T T, Li J, Yuan J L, et al. 3 μm Watt-level all-fiber lasers based on mid-IR dielectric-coated fiber mirrors[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2023, 41(1): 249-254.
- [5] 马连英, 周松青, 黄超, 等. 非链式重复频率 HF 激光器激光介质净化技术[J]. 强激光与粒子束, 2018, 30: 051003. (Ma Lianying, Zhou Songqing, Huang Chao, et al. Purifying technology for non-chain discharge-pumped HF laser media at high frequency[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2018, 30: 051003)
- [6] 郭建增, 王杰, 赵海涛, 等. 连续波氟化氢激光输出光谱特性研究[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55: 021404. (Guo Jianzeng, Wang Jie, Zhao Haitao, et al. Output spectrum of continuous wave hydrogen fluoride laser[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55: 021404)
- [7] Fried W A, Chan K H, Darling C L, et al. Use of a DPSS Er: YAG laser for the selective removal of composite from tooth surfaces[J]. *Biomedical Optics Express*, 2018, 9(10): 5026-5036.
- [8] Borri S, Insero G, Santambrogio G, et al. High-precision molecular spectroscopy in the mid-infrared using quantum cascade lasers[J]. *Applied Physics B*, 2019, 125: 18.
- [9] Walsh B M, Lee H R, Barnes N P. Mid infrared lasers for remote sensing applications[J]. *Journal of Luminescence*, 2016, 169: 400-405.
- [10] 许晓军. 高能激光六十年: 回顾与展望[J]. 强激光与粒子束, 2020, 32: 011007. (Xu Xiaojun. Retrospect and prospect on 60-year development of high energy laser[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2020, 32: 011007)
- [11] 李定, 熊胜明. 离子束溅射氧化物薄膜的中红外特性[J]. 中国激光, 2015, 42: 0107002. (Li Ding, Xiong Shengming. Mid-infrared properties of oxide coatings prepared by ion beam sputtering deposition[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42: 0107002)
- [12] Rudisill J E, Lohneiss W H, Jeffers W Q. Ultralow absorption coatings for mid-infrared cw lasers[C]. Proceedings of the SPIE 2253, Optical Interference Coatings. 1994: 802-808.
- [13] Gordon I E, Rothman L S, Hargreaves R J, et al. The HITRAN2020 molecular spectroscopic database[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2022, 277: 107949.
- [14] Zeng T T, Zhu M P, Chai Y J, et al. Effects of water adsorption on properties of electron-beam $\text{HfO}_2/\text{SiO}_2$ high-reflection coatings[J]. *Thin Solid Films*, 2020, 697: 137826.
- [15] Dekkers H F W, Gallo A, Van Elshocht S. Infrared molar absorption coefficient of H_2O stretching modes in SiO_2 [J]. *Thin Solid Films*, 2013, 542: 8-13.
- [16] 李斌成, 龚元. 光腔衰荡高反射率测量技术综述[J]. 激光与光电子学进展, 2010, 47: 021203. (Li Bincheng, Gong Yuan. Review of cavity ring-down techniques for high reflectivity measurements[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, 47: 021203)
- [17] 高丽峰, 熊胜明, 李斌成, 等. 用光腔衰荡技术测量镜片的反射率[J]. 强激光与粒子束, 2005, 17(3): 335-338. (Gao Lifeng, Xiong Shengming, Li Bincheng, et al. Analysis of reflectivity measurement by cavity ring-down spectroscopy[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, 17(3): 335-338)
- [18] ISO 13142: 2015, Optics and photonics – lasers and laser-related equipment – cavity ring-down method for high-reflectance and high-transmittance measurement[S].
- [19] Xiao Shilei, Li Bincheng, Wang Jing. Precise measurements of super-high reflectance with cavity ring-down technique[J]. *Metrologia*, 2020, 57: 055002.
- [20] Cui Hao, Li Bincheng, Han Yanling, et al. Extinction measurement with open-path cavity ring-down technique of variable cavity length[J]. *Optics Express*, 2016, 24(12): 13343-13350.
- [21] Winkler G, Perner L W, Truong G W, et al. Mid-infrared interference coatings with excess optical loss below 10 ppm[J]. *Optica*, 2021, 8(5): 686-696.