



中华人民共和国国家标准

GB/T XXXXX—XXXX

量子技术 超高反射率光学薄膜 性能表征及测量方法

Quantum Technology — Characterization and measurement of the performance of ultrahigh-reflectivity optical thin films

（征求意见稿）

（本草案完成时间：2026 年 6 月 30 日）

在提交反馈意见时，请将您知道的相关专利连同支持性文件一并附上。

XXXX – XX – XX 发布

XXXX – XX – XX 实施

国家市场监督管理总局
国家标准化管理委员会 发布

目 次

前言 II

1 范围 3

2 规范性引用文件 3

3 术语和定义 3

4 超高反射率光学薄膜的概述 4

5 测量条件 5

6 测量设备 6

7 测量方法 7

8 测试报告 21

附录 A（规范性） 光学谐振腔..... 22

附录 B（规范性） 表面形貌误差..... 25

附录 C（规范性） 标准反射镜的反射率、透射率和光学损耗、吸收率标定方法..... 28

附录 D（资料性） 散射损耗测量的光学系统..... 30

附录 E（资料性） PDH 锁频原理 32

附录 F（资料性） 测试报告..... 34

参考文献 39

前 言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由全国量子技术标准化技术委员会（SAC/TC 578）提出并归口。

本文件起草单位：中国科学技术大学、合肥国家实验室、北京大学、电子科技大学、成都速派光学技术有限公司、中国计量科学研究院、山西大学、中国计量大学、北京航天时代激光导航技术有限责任公司、济南量子技术研究院、中国科学院上海光学精密机械研究所、中国科学院大连化学物理研究所、中国标准化研究院、埃特曼半导体技术有限公司、清华大学、中国人民解放军国防科技大学、同济大学、北京理工大学、深圳长朗智能科技有限公司、河南省科学院。

本文件主要起草人：霍永恒、张熙博、李斌成、廖荣、黄智强、甘海勇、胡水明、孙青、马维光、谭爱红、章光建、钟东勳、徐凭、戴汉宁、陈宇翱、王超凡、王胭脂、郑耀辉、邓淞文、张萌、周均铭、王旭光、郭强强、颜立新、彭小强、张志强、张锦龙、张安宁、李刚、劳长石、孙超伟、徐红星。

量子技术 超高反射率光学薄膜性能表征及测量方法

1 范围

本文件描述了超高反射率光学薄膜（以下简称“薄膜”）的性能表征及测量方法。
本文件适用于在工作波段具有99.99%-99.9999%反射率的光学薄膜的性能表征及测量。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB 44703-2024 光辐射安全通用要求

GB/T 7247.1-2024 激光产品的安全 第1部分：设备分类和要求

GB/T 15313-2008 激光术语（ISO 11145:2006，MOD）

GB/T 25915.1-2021 洁净室及相关控制环境 - 第1部分：空气洁净度分级

GB/T 26331-2010 光学薄膜元件环境适应性试验方法

GB/T 38245-2019 光学和光学仪器 - 激光和激光相关设备 - 光学激光部件的吸收率测试方法

GJB 2502.7-2006 航天器热控涂层试验方法 第7部分 真空 - 电子辐照试验

ASTM E2387-19 角分辨光学散射的标准实施规范（Standard Practice for Goniometric Optical Scatter Measurements）

3 术语和定义

GB/T 15313-2008界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

反射光学薄膜 reflective optical thin film

使用一种或多种材料沉积在基片表面，用于改变基片光学性质，在工作波长范围内起到提高光反射率作用的薄膜。

注：在实际操作中，薄膜需要依附基片存在，将基片及薄膜作为一个整体（以下称为反射镜）进行检验测量。

3.2

超高反射率光学薄膜 ultrahigh-reflectivity optical thin film

在工作波段反射率处于99.99%-99.9999%之间的反射光学薄膜（3.1）。

3.3

反射率 reflectivity

在工作波段和特定偏振态、入射角条件下，反射光辐射通量与入射光辐射通量之比。

3.4

透射率 transmissivity

在工作波段和特定偏振态、入射角条件下，透射光辐射通量与入射光辐射通量之比。

3.5

光学损耗 optical loss

在工作波段和特定偏振态、入射角条件下，光辐射通量的损失量与入射光辐射通量之比。

注：一般由吸收损耗和散射损耗组成。

3.6

吸收损耗 absorption loss

由薄膜吸收光引起的一种光学损耗（3.5）。

3.7

散射损耗 scattering loss

由薄膜散射光引起的一种光学损耗（3.5）。

注：本文件中的散射是指在某一表面或某一介质的作用下，光的传播由一个方向改变到多个方向，光的空间分布发生不可控变化而组成这束光的任一单色成分的频率不发生变化的过程，是一种由表面形貌误差和膜层缺陷等引起的光偏离几何光学镜面反射或透射方向的过程。

3.8

反射光谱 reflectivity spectrum

特定偏振态、入射角条件下反射光辐射通量与入射光辐射通量之比在不同光谱波长上的分布。

3.9

透射光谱 transmissivity spectrum

特定偏振态、入射角条件下透射光辐射通量与入射光辐射通量之比在不同光谱波长上的分布。

3.10

表面形貌误差 surface morphology error

薄膜的表面相对于标准光学表面的偏差。

注1：评定参数包括平均粗糙度、均方根偏差粗糙度和峰谷值，见附录B.1。

注2：按空间频率分为低空间频率表面形貌误差、中空间频率表面形貌误差和高空间频率表面形貌误差，见附录B.2。

3.11

布朗热噪声 brownian thermal noise

非绝对零度时，薄膜材料表面等效位移的随机涨落，并可进一步导致反射光或透射光相位、光学谐振腔长度和频率的随机波动。

3.12

布朗热噪声机械损耗 brownian thermal noise mechanical loss

薄膜中应力和应变的相位滞后，表现为薄膜在振动过程中每个周期损失弹性能与总弹性能的比值。机械损耗是薄膜布朗热噪声的来源，其数值与布朗热噪声水平正相关。

3.13

环境适应性 environmental adaptability

薄膜在外部因素如湿热、辐照等干扰下的性能稳定性。

4 超高反射率光学薄膜概述

4.1 基本原理和典型结构

根据不同的反射率，反射光学薄膜分为五类，如表1所示。

表1 反射光学薄膜分类

类别	反射率
低反射率光学薄膜	0%-90%
中反射率光学薄膜	90%-99%
高反射率光学薄膜	99%-99.99%
超高反射率光学薄膜	99.99%-99.9999%
极高反射率光学薄膜	>99.9999%

根据分布式布拉格反射镜原理，超高反射率光学薄膜应由高折射率（ n_H ）材料和低折射率（ n_L ）材料交替沉积组成，结构中每个界面的反射光基于薄膜光学厚度构建的位相差，形成对目标波长的相干增强，从而达到设定的超高反射率。在不考虑其他指标优化的条件下，为得到最高的反射率水平，超高反射率光学薄膜的结构应满足：每层的光学厚度为目标工作波长的四分之一，即满足公式（1）。

$$n_H d_H = n_L d_L = \frac{\lambda}{4} \dots\dots\dots (1)$$

式中：

n_H ——高折射率材料的折射率，无量纲；

n_L ——低折射率材料的折射率，无量纲；

d_H ——高折射率材料的膜层厚度，单位为米（m）；

d_L ——低折射率材料的膜层厚度，单位为米（m）；

λ ——工作波长，单位为米（m）。

4.2 性能表征参数

完整的性能表征应对超高反射率光学薄膜的反射率、透射率、光学损耗、吸收损耗、散射损耗、布朗热噪声机械损耗、反射光谱、透射光谱、表面形貌误差和环境适应性进行测试。

注1：性能表征参数中，反射光谱可作为反射率测试的参考，透射光谱可作为透射率测试的参考，表面形貌误差可作为散射损耗分析的参考。

注2：对于反射率高于99.9999%的极高反射率光学薄膜，本文件规定的测试方法经不确定度评估与设备升级后，可提供技术基础和参考。

5 测量条件

5.1 环境条件

除环境适应性测试中特殊注明的条件外，其他测试的环境应满足以下要求：

- a) 温度范围：20℃～25℃；
- b) 相对湿度：≤60%；
- c) 环境洁净：达到 GB/T 25915.1-2021 中 7 级洁净室的要求；
- d) 供电电源：（220±10）V，（50±1）Hz；
- e) 振动和干扰：无影响试验工作的光噪声、明显气流、电磁辐射或机械振动。

5.2 辐射安全条件

测量现场应符合 GB 44703-2024 和 GB/T 7247.1-2024 中激光辐射安全和防护要求的规定。

5.3 样品准备

5.3.1 样品储存

应在惰性、干燥和洁净的气氛保护中储存，并满足以下要求：

- a) 温度范围：20℃～25℃；
- b) 相对湿度：≤60%；
- c) 环境洁净：达到 GB/T 25915.1-2021 中 7 级洁净室的要求。

5.3.2 样品清洁

应在性能表征前对样品进行清洁，可参考如下步骤操作：

- a) 颗粒去除：使用高纯氮气（>99.999%）或过滤洁净空气吹扫样品表面；
- b) 有机试剂清洁：使用无尘擦拭材料，蘸取分析纯无水乙醇或异丙醇轻微清洗；
- c) 干燥处理：自然挥发或氮气吹干；
- d) 显微检查：在暗场或明场条件下使用光学显微镜观察表面是否残余颗粒或污染。

6 测量设备

6.1 可调谐激光器

可调谐激光器用于产生可调谐的与待测光学谐振腔匹配的激光，参数要求如下：

- a) 激光波长：覆盖待测样品的设计工作波长；
- b) 光束质量：应满足测试中组成的光学谐振腔的耦合需求；
- c) 激光功率：使测试中组成的光学谐振腔透射功率满足光电探测器和相机的探测能力；
- d) 激光线宽：应与测试中组成的光学谐振腔线宽相匹配；
- e) 无跳模调谐范围：大于待测光学谐振腔的自由光谱范围；
- f) 配备快反馈和慢反馈调节端口，可搭配 PDH 锁频模块与光学谐振腔进行锁定。

6.2 泵浦激光器

泵浦激光器用于产生高功率的激光使样品吸收并发生光热畸变，参数要求如下：

- a) 激光波长：覆盖待测样品的设计工作波长；
- b) 光束质量：应使样品产生分布规则的光热畸变以满足测试需求；
- c) 激光功率：使测试中样品吸收产热的光热畸变信号幅度满足探测能力。

6.3 光电探测器

光电探测器将光信号转换成电信号，参数要求如下：

- a) 波长范围：覆盖待测光信号的波长；
- b) 上升时间：应能够分辨待测光学谐振腔的动态过程；
- c) 噪声等效功率：应与可调谐激光器的输出功率匹配，满足弱信号测量需求；
- d) 动态范围：应能够覆盖测量过程中的信号幅度变化。

6.4 激光干涉仪

激光干涉仪用于测量样品的低空间频率表面形貌误差。

6.5 白光干涉仪

白光干涉仪用于测量样品的中空间频率表面形貌误差。

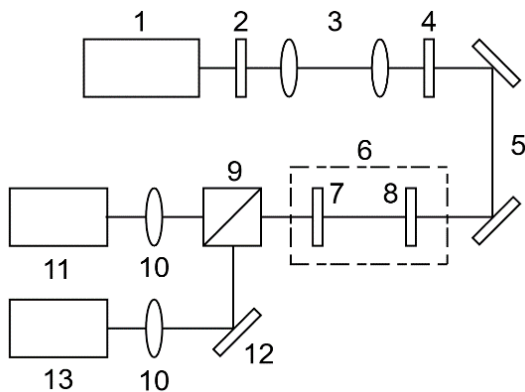
6.6 原子力显微镜

原子力显微镜用于测量样品的高空间频率表面形貌误差。

7 测量方法

7.1 反射率

7.1.1 光关断式光腔衰荡法



标引序号说明：

- | | |
|----------------|------------|
| 1——可调谐激光器及控制器； | 8——待测反射镜； |
| 2——偏振装置； | 9——分束镜； |
| 3——模式匹配透镜组； | 10——聚焦透镜； |
| 4——光开关； | 11——相机； |
| 5——模式匹配反射镜组； | 12——反射镜； |
| 6——真空腔和真空泵组； | 13——光电探测器。 |
| 7——标准反射镜； | |

图1 光关断式光腔衰荡法反射率测量装置框图

按以下步骤进行测试：

- a) 按图 1 所示搭建测量装置，结合用户需求，确定光斑大小，开展针对性测试；
- b) 按附录 A. 1 对光学谐振腔的稳定性要求，为待测反射镜选取一块曲率半径合适的标准反射镜；
- c) 将待测反射镜和标准反射镜用光学调整架固定或光胶到一个腔身上，形成稳定的光学谐振腔；
- d) 将装配好的光学谐振腔安装在光路内，根据工作波长下的大气吸收率，选择大气环境或真空环境安装光学谐振腔，使得光学谐振腔内气体对测量激光的吸收可以忽略；
- e) 启动激光器预热 30 分钟；
- f) 调整偏振装置，输出送检方要求的测试偏振状态；
- g) 调整模式匹配反射镜组，实现激光与光学谐振腔的共轴；
- h) 调整模式匹配透镜组，调整光束束腰位置至谐振腔的中心处且束腰光斑与谐振腔基横模空间匹配，通过光路后部的相机观察到光斑形状为圆光斑；
- i) 按附录 A. 2 对光学谐振腔横模频率的要求，根据送检方的要求改变激光器频率，使得激光与光学谐振腔的特定横模匹配，通过光路后部的相机观察到光斑形状为对应横模的形状；
- j) 调整聚焦透镜和光电探测器，得到初始光功率 I_0 ；

- k) 关闭光开关,或使用脉冲输出式激光器,使输出激光被关断,光关断的时间应远小于腔衰荡时间,避免产生影响;使用数据采集装置得到输出光功率 $I(t)$,根据公式(2)进行函数拟合得到 τ ;

$$I(t) = I_0 \exp\left(\frac{-t}{\tau}\right) + I_{bg} \dots\dots\dots (2)$$

式中:

$I(t)$ ——激光输入关断后随时间变化的透射光功率,单位为瓦(W);

I_0 ——激光输入关断前的初始透射光功率,拟合参数之一,单位为瓦(W);

I_{bg} ——背景光功率信号,拟合参数之一,单位为瓦(W);

t ——时间,单位为秒(s);

τ ——光腔衰荡特征时间,拟合参数之一,单位为秒(s),

- 1) 在光学谐振腔内气体对测量激光的吸收可以忽略的条件下,光腔衰荡特征时间 τ 表示为公式(3),根据公式(3)计算得到两面反射镜反射率之积。根据公式(4),由两面反射镜中标准反射镜的已知反射率计算得到待测反射镜的反射率,标准反射镜的反射率按附录C标定。

$$\tau = \frac{-L}{c \ln \sqrt{R_1 R_2}} \dots\dots\dots (3)$$

$$R_2 = \frac{1}{R_1} e^{\frac{-2L}{c\tau}} \dots\dots\dots (4)$$

式中:

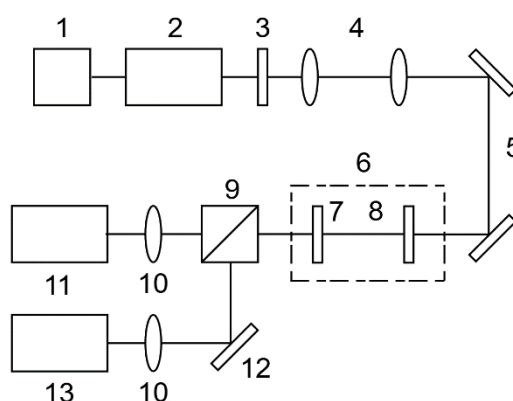
L ——光学谐振腔的长度,单位为米(m);

c ——真空中光速,单位为米每秒(m/s);

R_1 ——标准反射镜的反射率,无量纲;

R_2 ——待测反射镜的反射率,无量纲。

7.1.2 快速扫频光腔衰荡法



标引序号说明:

- | | |
|----------------|------------|
| 1——信号发生器; | 8——待测反射镜; |
| 2——可调谐激光器及控制器; | 9——分束镜; |
| 3——偏振装置; | 10——聚焦透镜; |
| 4——模式匹配透镜组; | 11——相机; |
| 5——模式匹配反射镜组; | 12——反射镜; |
| 6——真空腔和真空泵组; | 13——光电探测器。 |
| 7——标准反射镜; | |

图2 快速扫频光腔衰荡法反射率测量装置框图

应按以下步骤进行测试：

- 按图 2 所示搭建测量装置，结合用户需求，确定光斑大小，开展针对性测试；
- 按附录 A.1 对光学谐振腔的稳定性要求，为待测反射镜选取一块曲率半径合适的标准反射镜；
- 将待测反射镜和标准反射镜用光学调整架固定或光胶到一个腔身上，形成稳定的光学谐振腔；
- 将装配好的光学谐振腔安装在光路内，根据工作波长下的大气吸收率，选择大气环境或真空环境安装光学谐振腔，使得光学谐振腔内气体对测量激光的吸收可以忽略；
- 启动激光器预热 30 分钟；
- 调整偏振装置，输出送检方要求的测试偏振状态；
- 调整模式匹配反射镜组，实现激光与光学谐振腔的共轴；
- 调整模式匹配透镜组，调整光束束腰位置至谐振腔的中心处且束腰光斑与谐振腔基横模空间匹配，通过光路后部的相机观察到光斑形状为圆光斑；
- 按附录 A.2 对光学谐振腔横模频率的要求，根据送检方的要求改变激光器频率，使得激光与光学谐振腔的特定横模匹配，通过光路后部的相机观察到光斑形状为对应横模的形状；
- 调整聚焦透镜和光电探测器，得到最大的初始光功率信号；
- 使用信号发生器产生三角波，将调制信号输入激光器的调谐端口；
- 调整三角波的频率和幅值，使得激光频率扫过光学谐振腔共振频率的时间与光腔衰荡特征时间为同一量级，使用数据采集装置记录透射端光功率 $I(t)$ ，得到由扫频失谐引起的振荡衰减透射信号，并按公式 (5) 进行拟合。

$$I(t) = S \left| \sqrt{\frac{\pi}{2}} \exp \left[-\frac{t-t_0}{2\tau} + i\nu \left(\frac{t-t_0}{2\tau} \right)^2 - \frac{i}{2\nu} \right] + i\sqrt{2}D \left[\frac{2i\tau + \nu(t-t_0)}{2\sqrt{2}i\nu\tau} \right] \right|^2 + I_{bg} \dots\dots\dots (5)$$

式中：

$I(t)$ ——扫频失谐后激光随时间变化的透射光功率，单位为瓦（W）；

S ——幅度比例因子，拟合参数之一，单位为瓦（W）；

I_{bg} ——背景光功率信号，拟合参数之一，单位为瓦（W）；

τ ——光腔衰荡特征时间，拟合参数之一，单位为秒（s）；

ν ——归一化扫频速率，拟合参数之一，无量纲；

t_0 ——扫过共振附近的时间零点，拟合参数之一，单位为秒（s）；

t ——时间，单位为秒（s）；

i ——虚数符号；

$D(x)$ ——道森积分函数。

- 在光学谐振腔内气体对测量激光的吸收可以忽略的条件下，光腔衰荡特征时间 τ 表示为公式 (6)，根据公式 (6) 计算得到两面反射镜反射率之积；根据公式 (7)，由两面反射镜中标准反射镜的已知反射率计算得到待测反射镜的反射率，标准反射镜的反射率按附录 C 标定。

$$\tau = \frac{-L}{c \ln \sqrt{R_1 R_2}} \dots\dots\dots (6)$$

$$R_2 = \frac{1}{R_1} e^{\frac{-2L}{c\tau}} \dots\dots\dots (7)$$

式中：

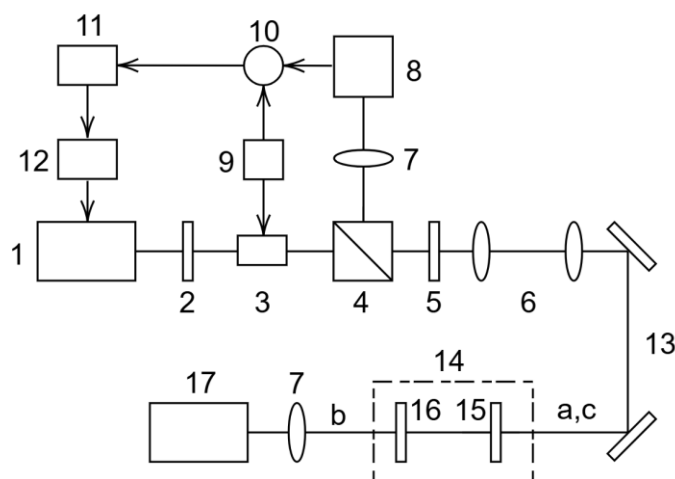
L ——光学谐振腔的长度，单位为米（m）；

c ——真空中光速，单位为米每秒（m/s）；

R_1 ——标准反射镜的反射率，无量纲；

R_2 ——待测反射镜的反射率，无量纲。

7.2 透射率和光学损耗



标引序号说明：

- | | |
|-------------|-----------------------|
| 1——激光器及控制器； | 10——混频器； |
| 2——偏振装置； | 11——低通滤波器； |
| 3——电光调制器； | 12——PID（比例-积分-微分）控制器； |
| 4——偏振分束器； | 13——模式匹配反射镜组； |
| 5——四分之一波片； | 14——真空腔和真空泵组； |
| 6——模式匹配透镜组； | 15——入射反射镜； |
| 7——聚焦透镜； | 16——出射反射镜； |
| 8——光电探测器； | 17——相机； |
| 9——信号发生器； | a\b\c——光功率计探头的不同放置位置。 |

图3 透射率和光学损耗测量装置框图

应按以下步骤进行测试：

- 按图 3 所示搭建测量装置，可参考附录 E。结合用户需求，确定光斑大小，开展针对性测试；
- 按附录 A.1 对光学谐振腔的稳定性要求，为待测反射镜选取一块曲率半径合适的标准反射镜；
- 将待测反射镜和标准反射镜用光学调整架固定或光胶到一个腔身上，形成稳定的光学谐振腔；
- 将装配好的光学谐振腔安装在光路内，根据工作波长下的大气吸收率，选择大气环境或真空环境安装光学谐振腔，使得光学谐振腔内气体对测量激光的吸收可以忽略；
- 启动激光器预热 30 分钟；
- 调整偏振装置，使激光偏振方向对准偏振分束器的透射偏振轴；
- 启动信号发生器，驱动电光调制器工作。设置激光扫频，记录载波和边带光谱信息，进行峰面积积分计算，以峰面积之比计算载波占载波和边带总光功率的比值 β ；
- 调整四分之一波片的方向，使其与偏振分束器的透射轴呈 45° ；
- 调整模式匹配反射镜组，实现激光与光学谐振腔的共轴；
- 调整模式匹配透镜组，调整光束束腰位置至谐振腔的中心处且束腰光斑与谐振腔基横模空间匹配，通过光路后部的相机观察到光斑形状为圆光斑；

- k) 参照附录 A.2 对光学谐振腔横模频率的要求, 根据送检方的要求改变激光器频率, 使得激光与光学谐振腔的特定横模匹配, 通过光路后部的相机观察到光斑形状为对应横模的形状;
- l) 使用混频器, 将反射光电探测器的信号与信号发生器信号混频, 输入低通滤波器并传递给 PID 控制器, PID 控制器输出信号控制激光器频率改变, 实现激光器频率到谐振腔的锁定;
- m) 将光功率计探头分别放置在 a、b、c 处, 分别测量得到入射腔前功率 I_a 、出射腔后功率 I_b 、腔前反射功率 I_c ;

注: 实际的测量中可能需要修正以得到正确的 I_a, I_b, I_c , 如在真空腔体外测量需要标定窗口的透射率, 如使用带楔角的反射镜需要考虑斜面非耦合方向的反射光功率贡献。

- n) 在光学谐振腔内气体对测量激光的吸收可以忽略的条件下, 根据入射反射镜的反射率 R_1 、透射率 T_1 、光学损耗 L_1 和出射反射镜的反射率 R_2 、透射率 T_2 、光学损耗 L_2 , 可以联立得到公式(8)~公式(11)的方程组, 根据测量中选定的标准反射镜, 将标准反射镜的已知反射率、已知透射率和已知光学损耗带入, 结合待测反射镜的已知反射率, 可以计算得到待测反射镜的透射率和光学损耗。标准反射镜的透射率和光学损耗按附录 C 标定。

$$\frac{I_b}{I_a} = \beta \eta \frac{4T_1T_2}{(T_1+T_2+L_1+L_2)^2} \dots\dots\dots (8)$$

$$\frac{I_c}{I_a} = \beta \eta \frac{(R_1-R_2+2L_1)^2}{(T_1+T_2+L_1+L_2)^2} + \beta(1-\eta) + (1-\beta) \dots\dots\dots (9)$$

$$R_1 + L_1 + T_1 = 1 \dots\dots\dots (10)$$

$$R_2 + L_2 + T_2 = 1 \dots\dots\dots (11)$$

式中:

I_a ——入射光学谐振腔前的激光功率, 单位为瓦 (W);

I_b ——出射光学谐振腔后的激光功率, 单位为瓦 (W);

I_c ——光学谐振腔前反射的激光功率, 单位为瓦 (W);

β ——激光通过电光调制器后载波占载波和边带总光功率的比值, 无量纲;

η ——入射激光和光学谐振腔的耦合效率, 无量纲;

R_1 ——入射反射镜的反射率, 无量纲;

R_2 ——出射反射镜的反射率, 无量纲;

L_1 ——入射反射镜的光学损耗, 无量纲;

L_2 ——出射反射镜的光学损耗, 无量纲;

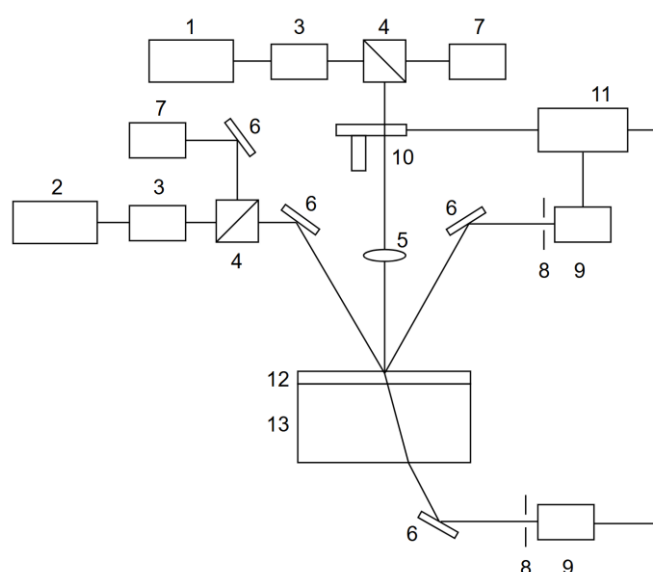
T_1 ——入射反射镜的透射率, 无量纲;

T_2 ——出射反射镜的透射率, 无量纲。

注: 耦合效率 η 是方程组求解的中间变量, 不是直接测量量。

7.3 吸收损耗

7.3.1 光热透镜法



标引序号说明：

- 1——泵浦激光；
2——探测激光；
3——扩束模块；
4——分束镜；
5——泵浦激光聚焦透镜；
6——反射镜；
7——功率监测光电探测器；

- 8——针孔光阑；
9——光热信号光电探测器；
10——斩波器；
11——锁相放大器；
12——薄膜；
13——衬底。

图4 基于光热透镜的弱吸收测量装置框图

应按以下步骤进行测试：

- 按图4所示搭建测量装置，应结合用户需求，确定光斑大小，开展针对性测试。根据样品热膨胀系数和折射率温度系数的差异，选择反射式和透射式测量中信号更显著的一种构型，如果被测样品对探测激光不透明，则选择反射式测量；
- 启动泵浦激光器和探测激光器预热30分钟；
- 调整扩束模块，使泵浦激光聚焦在样品台中心位置，形成的光斑直径需按照测试需求执行；
- 关闭泵浦激光，调整探测激光，使其以小角度（ 1° - 10° ）入射至样品台中心相同位置并反射或透射后严格垂直穿过针孔光阑，入射到探测器的感光面中心；要求探测激光光斑直径为泵浦激光光斑直径的五倍以上；
- 打开泵浦激光，关闭探测激光，装载样品并移动位移台，使泵浦激光入射在样品待测区域。微调样品角度，确保泵浦激光小角度（ 1° - 10° ）入射；
- 关闭泵浦激光，打开斩波器。设置调制频率为50Hz-2kHz之间，并使斩波器的工作频率和锁相放大器的参考频率相同，均为调制频率；设置锁相放大器的时间常数与参考频率相匹配；
- 使用锁相放大器测量探测信号的幅值和相位，记为系统本底噪声；
- 打开泵浦激光和探测激光，调节探测光斑与泵浦光斑的间距使光热透镜信号幅值最大化，记录锁相放大器输出信号幅值 V_{sig} ，泵浦激光功率 P_{pump} 和探测激光功率 P_{detect} ；
- 控制位移台，使得泵浦光斑在样品表面待测区域进行逐点或逐线扫描，获得扫描区域的吸收信号幅值分布图和相位分布图；
- 按公式（12）对所有点的 V_{sig} 进行归一化：

$$V_{norm} = \frac{V_{sig}}{P_{pump} * P_{detect}} \dots \dots \dots (12)$$

式中:

V_{norm} ——被归一化处理的实验信号幅值, 单位为伏特每平方瓦特 (V/W^2);

V_{sig} ——原始实验信号幅值, 单位为伏特 (V);

P_{pump} ——标定的泵浦激光功率, 单位为瓦特 (W);

P_{detect} ——标定的探测激光功率, 单位为瓦特 (W);

- k) 使用一个吸收率为 α_{std} 的标准样品, 重复步骤 e) ~ j), 得到标准样品的归一化信号幅值 V_{std} ; 标准样品的吸收损耗按附录 C 标定;

- l) 通过公式 (13) 计算待测样品任意点的吸收率 $\alpha(x, y)$:

$$\alpha(x, y) = \frac{V_{norm}(x, y)}{V_{std}} \alpha_{std} \dots \dots \dots (13)$$

式中:

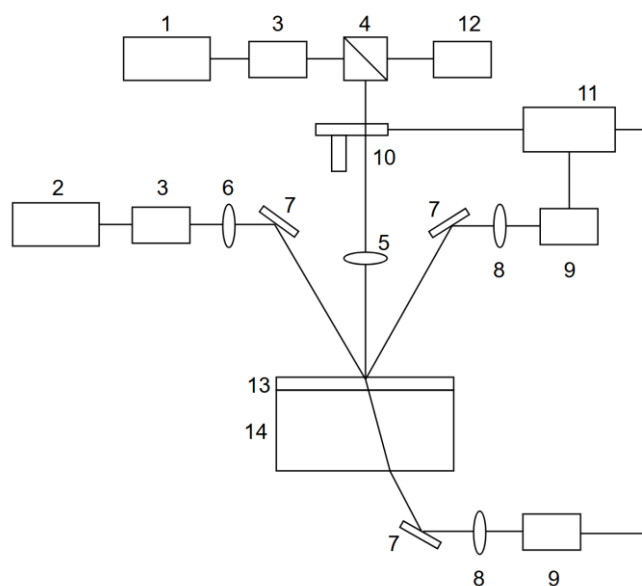
$\alpha(x, y)$ ——待测样品在某点的吸收率, 无量纲;

$V_{norm}(x, y)$ ——待测样品在某点的归一化实验信号幅值, 单位为伏特每平方瓦特 (V/W^2);

V_{std} ——标准样品的归一化实验信号幅值, 单位为伏特每平方瓦特 (V/W^2);

α_{std} ——标准样品的吸收率, 无量纲。

7.3.2 光热偏转法



标引序号说明:

1——泵浦激光;

2——探测激光;

3——扩束模块;

4——分束镜;

5——泵浦激光聚焦透镜;

6——探测激光聚焦透镜;

7——反射镜;

8——探测激光准直透镜;

9——光斑位置探测器;

10——斩波器;

11——锁相放大器;

12——功率监测光电探测器;

13——薄膜;

14——衬底。

图5 基于光热偏转的弱吸收测量装置框图

应按以下步骤进行测试：

- 按图 5 所示搭建测量装置，应结合用户需求，确定光斑大小，开展针对性测试；根据样品热膨胀系数和折射率温度系数的差异，选择反射式和透射式测量中信号更显著的一种构型，如果被测样品对探测激光不透明，则选择反射式测量；
- 启动泵浦激光器和探测激光器预热 30 分钟；
- 调整扩束模块，使泵浦激光聚焦在样品台中心位置，形成的光斑直径需按照测试需求执行；
- 关闭泵浦激光，调整探测激光，使其以小角度（ 1° - 10° ）入射至样品台中心相同位置并反射或透射后入射到光斑位置探测器的感光面中心。要求聚焦在样品台的探测激光光斑直径小于泵浦激光的聚焦光斑，且在实验过程中光斑位置探测器上的探测光斑保持在感光范围内；
- 打开泵浦激光，关闭探测激光，装载样品并移动位移台，使泵浦激光入射在样品待测区域。微调样品角度，确保泵浦激光小角度（ 1° - 10° ）入射；
- 关闭泵浦激光，打开斩波器。设置调制频率为 50Hz-2kHz 之间，并使斩波器的工作频率和锁相放大器的参考频率相同，均为调制频率。设置锁相放大器的时间常数与参考频率相匹配。
- 使用锁相放大器测量探测信号的幅值和相位，记为系统本底噪声；
- 打开泵浦激光和探测激光，调节探测光斑与泵浦光斑的间距使光热偏转信号幅值最大化，记录锁相放大器输出信号幅值 V_{sig} 和泵浦激光功率 P_{pump} ；
- 控制位移台，使得泵浦光斑在样品表面待测区域进行逐点或逐线扫描，获得扫描区域的吸收信号幅值分布图和相位分布图；
- 按公式（14）对所有点的 V_{sig} 进行归一化：

$$V_{norm} = \frac{V_{sig}}{P_{pump}} \dots\dots\dots (14)$$

式中：

V_{norm} ——被归一化处理的实验信号幅值，单位为伏特每瓦特（V/W）；

V_{sig} ——原始实验信号幅值，单位为伏特（V）；

P_{pump} ——标定的泵浦激光功率，单位为瓦特（W）；

- 使用一个吸收率为 α_{std} 的标准样品，重复步骤 e) ~ j)，得到标准样品的归一化信号幅值 V_{std} 。标准样品的吸收损耗按附录 C 标定；
- 通过公式（15）计算待测样品任意点的吸收率 $\alpha(x, y)$ ：

$$\alpha(x, y) = \frac{V_{norm}(x, y)}{V_{std}} \alpha_{std} \dots\dots\dots (15)$$

式中：

$\alpha(x, y)$ ——待测样品在某点的吸收率，无量纲；

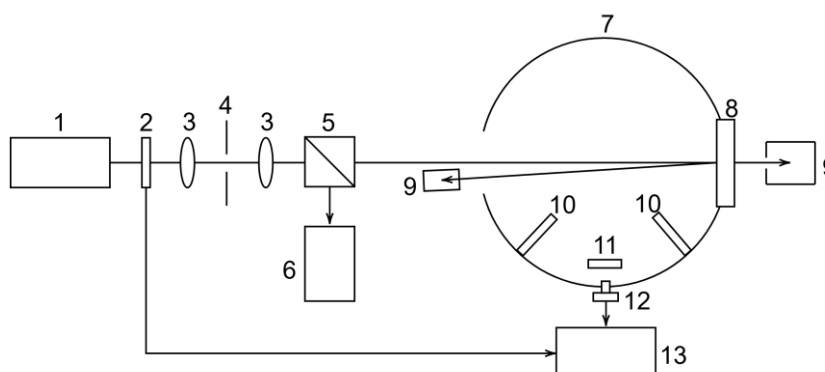
$V_{norm}(x, y)$ ——待测样品在某点的归一化实验信号幅值，单位为伏特每瓦特（V/W）；

V_{std} ——标准样品的归一化实验信号幅值，单位为伏特每瓦特（V/W）；

α_{std} ——标准样品的吸收率，无量纲。

7.4 散射损耗

7.4.1 积分球总散射测量方法



标引序号说明：

- | | |
|-------------|--------------|
| 1——激光器； | 8——待测反射镜； |
| 2——斩光器； | 9——消光陷阱； |
| 3——光束处理系统； | 10——挡光片； |
| 4——空间滤波器； | 11——散射片； |
| 5——分束镜； | 12——散射能量探测器； |
| 6——能量修正探测器； | 13——锁相放大器。 |
| 7——积分球； | |

图6 基于积分球法的散射损耗测量装置框图

应按以下步骤进行测试：

- 按图6所示搭建测量装置，可参考附录D.2节搭建空间滤波模块；应结合用户需求，确定光斑大小，开展针对性测试；
- 启动光源预热30分钟；
- 调节光路，使光束对准并穿过空间滤波器，准直穿过积分球入口和出口中心；
- 使用经过标定的探测器在测试位置（积分球出口处）测量并记录入射光束功率 P_i ，同时记录能量修正探测器信号幅值 V_{im} ；
- 移除功率计，在测试位置放入标准散射白板，记录散射能量探测器信号幅值 V_c 和能量修正探测信号幅值 V_{cm} ；
- 将标准白板替换为待测反射镜，使光束 0° 入射在待测反射镜有效区域，记录此时散射能量探测器信号幅值 V_s 和能量修正探测器信号幅值 V_{sm} ；
- 移除待测反射镜，进行背景散射噪声的积分测量，记录此时散射能量探测器信号幅值 V_{s0} 和能量修正探测器信号幅值 V_{sm0} ；
- 根据公式（16）计算得到待测反射镜的散射损耗：

$$TS = \frac{V_s V_{cm}}{V_c V_{sm}} - \frac{V_{s0} V_{cm}}{V_c V_{sm0}} \dots\dots\dots (16)$$

式中：

TS ——总散射损耗，无量纲；

V_c ——标准白板的散射能量探测器信号幅值，单位为伏特（V）；

V_{cm} ——标准白板的能量修正探测信号幅值，单位为伏特（V）；

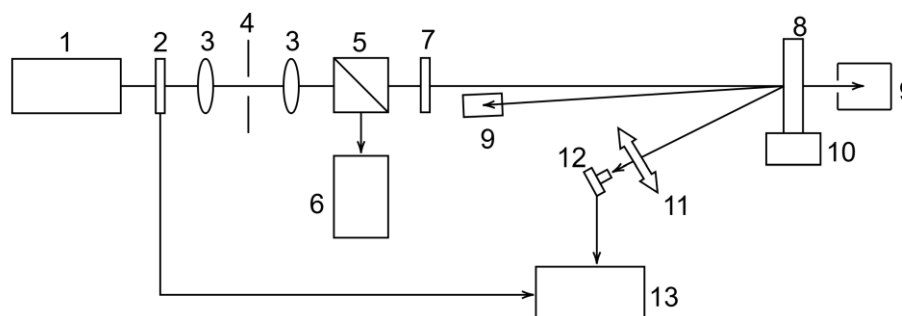
V_s ——待测样品的散射能量探测器信号幅值，单位为伏特（V）；

V_{sm} ——待测样品的能量修正探测信号幅值，单位为伏特（V）；

V_{s0} ——空载时的散射能量探测器信号幅值，单位为伏特（V）；

V_{sm0} ——空载时的能量修正探测信号幅值，单位为伏特（V）。

7.4.2 角分辨散射测量方法



标引序号说明：

1——激光器；

2——斩光器；

3——光束处理系统；

4——空间滤波器；

5——分束镜；

6——能量修正探测器；

7——滤光片；

8——待测反射镜；

9——消光陷阱；

10——样片调整机构；

11——角度扫描机构；

12——散射能量探测器；

13——锁相放大器。

图7 基于角分辨散射仪的散射损耗测量装置框图

应按以下步骤进行测试：

- 按图7所示搭建测量装置，可参考附录D；应结合用户需求，确定光斑大小，开展针对性测试；
- 启动激光器预热30分钟；
- 调节光路，使光束经过准直扩束后，会聚穿过空间滤波器，再由准直光学系统收集；
- 将标准滤光片放置在光路中，记录透射前后的光功率，计算出滤光片透射率；
- 按照 ASTM E2387-19 标准的相对标定法对角分辨散射测量仪的入射光束功率进行标定：在样品调整机构上放入标准散射白板，使光束 0° 入射在白板有效区域。在零散射角或指定参考角度处，测量探测器输出信号，结合已知白板 BRDF 数据，反推出入射光功率；
- 将标准白板替换为待测样品，使光束 0° 入射在待测样品有效区域，并按照测试要求调整待测样品处的光斑大小；
- 设置测试波长 λ 、入射角 θ_i 、散射极角 θ_s 范围及扫描角度步长；
- 启动角度扫描机构，使散射探测器绕样品中心旋转，按照 ASTM E2387-19 标准进行角分辨散射特性 BRDF 测量；
- 移除待测反射镜，重复步骤 h)，进行背景散射噪声角分辨散射特性 BRDF 测量；
- 根据公式（17）计算得到待测样品的散射损耗为：

$$TIS(\theta_i, \lambda) = 2\pi \int_{3^\circ}^{85^\circ} (BRDF - BRDF_0) \sin\theta_s \cos\theta_s d\theta_s \dots\dots\dots (17)$$

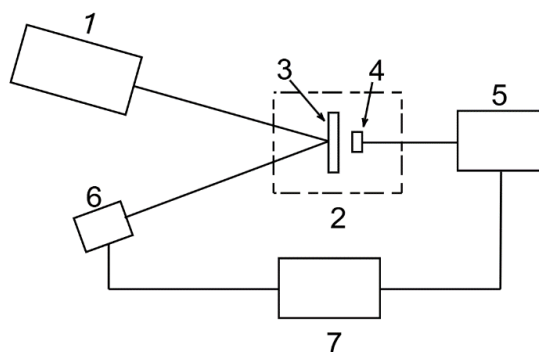
式中：

TIS ——总积分散射损耗（Total Integrated Scattering），无量纲；

- θ_i ——入射角，单位为弧度制角度（rad）；
 λ ——探测激光波长，单位为米（m）；
 $BRDF$ ——待测样品测试得到的双向反射分布函数，单位为球面度倒数（1/sr）；
 $BRDF_0$ ——空载时测试得到的双向反射分布函数，单位为球面度倒数（1/sr）；
 θ_s ——散射极角，即探测器所在的空间角度，单位为弧度制角度（rad）。

注：数据分析时应去除镜面反射方向 3° 以内的测量数据，以排除镜面反射对总散射测量的影响。

7.5 布朗热噪声机械损耗



标引序号说明：

- | | |
|-----------|----------------|
| 1——激光器； | 5——高压交流信号发生装置； |
| 2——真空腔； | 6——光斑位置探测器； |
| 3——待测样品； | 7——控制及数据处理单元。 |
| 4——静电驱动板； | |

图8 布朗热噪声机械损耗测量装置框图

应按以下步骤进行测试：

- 按图8所示搭建测量装置；
- 将未镀膜的衬底装夹好，放入真空腔内，启动真空泵组，获得 $<1\text{e-}3\text{Pa}$ 的真空度；
- 启动激光器，光信号入射样品，反射光经过光路对准光斑位置探测器中心；
- 使用高压交流信号发生装置，激发样品本征振动；
- 撤去高压交流信号，记录光斑位置探测器上光斑的位置信息；
- 将光斑位置信息进行滤波和锁相放大处理，得到振幅衰减信号，将其按指数衰减函数公式(18)拟合得到衰荡特征时间 τ ：

$$x(t) = x_0 \exp\left(\frac{-t}{\tau}\right) \dots\dots\dots (18)$$

式中：

- x ——振动幅度，单位为米（m）；
 x_0 ——振动幅度的初值，单位为米（m）；
 t ——时间，单位为秒（s）；
 τ ——衰荡特征时间，单位为秒（s）。
g) 由振动频率 f 、衰荡时间 τ 根据公式(19)计算得到机械损耗 ϕ ，此时得到的机械损耗是未镀膜衬底的机械损耗 ϕ_{uncoated} ：

$$\tau = \frac{1}{\pi f \phi} \dots\dots\dots (19)$$

式中：

f ——振动频率，单位为赫兹（Hz）；

ϕ ——机械损耗，无量纲；

τ ——衰荡特征时间，单位为秒（s）；

h) 破真空取出样品，在其上制备待测薄膜后重复步骤 a)～f) 步，得到镀膜衬底机械损耗 ϕ_{coated} ；

i) 根据公式（20）使用有限元仿真方法计算薄膜和衬底的弹性形变能：

$$U = \int_V \frac{1}{2} C_{ijkl} \varepsilon_{ij} \varepsilon_{kl} dV \dots\dots\dots (20)$$

式中：

U ——计算区域的弹性形变能，单位为焦耳（J）；

C ——弹性模量矩阵元，单位为帕（Pa）；

ε ——应变张量向量元，无量纲。

j) 在 $U_c \ll U_s$ 且忽略高阶小量时，按照公式（21）计算得到待测薄膜的机械损耗：

$$\phi_{coating} = \frac{U_s}{U_c} (\phi_{coated} - \phi_{uncoated}) \dots\dots\dots (21)$$

式中：

$\phi_{coating}$ ——薄膜机械损耗，无量纲；

ϕ_{coated} ——镀有薄膜的测试衬底机械损耗，无量纲；

$\phi_{uncoated}$ ——未镀薄膜的测试衬底机械损耗，无量纲；

U_s ——测试衬底的弹性形变能，单位为焦耳（J）；

U_c ——薄膜的弹性形变能，单位为焦耳（J）。

7.6 反射光谱

7.6.1 总则

反射光谱的测量使用分光光度计或傅里叶变换红外光谱仪，仪器的选择取决于测试仪器的光谱范围和样品待测光谱范围，测试仪器的光谱范围应包括样品待测光谱范围。

7.6.2 分光光度计方法

使用分光光度计测量反射光谱时，应按以下步骤进行测试：

- 启动光源预热 30 分钟；
- 设定扫描的光谱范围；
- 调整偏振装置至要求的偏振态；
- 将光电探测器移动至透射位置，测量背景光谱信息；
- 安装样品并调整朝向，满足要求的入射角；
- 将光电探测器移动至对应反射位置，测量样品光谱信息；
- 处理背景光谱和样品光谱信息得到样品反射光谱。

7.6.3 傅里叶变换红外光谱仪方法

使用傅里叶变换红外光谱仪测量反射光谱时，应按以下步骤进行测试：

- 启动光源预热 30 分钟；
- 设定扫描的光谱范围；
- 测量背景光谱信息；

- d) 安装样品并调整朝向，满足要求的入射角；
- e) 测量样品光谱信息；
- f) 处理背景光谱和样品光谱信息得到样品反射光谱。

7.7 透射光谱

7.7.1 总则

透射光谱的测量使用分光光度计或傅里叶变换红外光谱仪，仪器的选择取决于测试仪器的光谱范围和样品待测光谱范围，测试仪器的光谱范围应包括样品待测光谱范围。

7.7.2 分光光度计方法

使用分光光度计测量透射光谱时，应按以下步骤进行测试：

- a) 启动光源预热 30 分钟；
- b) 设定扫描的光谱范围；
- c) 调整偏振装置至要求的偏振态；
- d) 将光电探测器移动至透射位置，测量背景光谱信息；
- e) 安装样品并调整朝向，满足要求的入射角；
- f) 将光电探测器移动至对应透射位置，测量样品光谱信息；
- g) 处理背景光谱和样品光谱信息得到样品透射光谱。

7.7.3 傅里叶变换红外光谱仪方法

使用傅里叶变换红外光谱仪测量透射光谱时，应按以下步骤进行测试：

- a) 启动光源预热 30 分钟；
- b) 设定扫描的光谱范围；
- c) 测量背景光谱信息；
- d) 安装样品并调整朝向，满足要求的入射角；
- e) 测量样品光谱信息；
- f) 处理背景光谱和样品光谱信息得到样品透射光谱。

7.8 表面形貌误差

7.8.1 低空间频率表面形貌误差测试

应使用激光干涉仪，按以下步骤进行测试：

- a) 启动光源预热 30 分钟；
- b) 根据面形选择合适参考镜；
- c) 调整样品俯仰与偏摆角度，使其尽可能与探测激光波前重合；
- d) 测量记录样品表面三维坐标数据，计算面形 PV 值，RMS 值等信息。

7.8.2 中空间频率表面形貌误差测试

应使用白光干涉仪，按以下步骤进行测试：

- a) 启动光源预热 30 分钟；
- b) 按测量要求选择合适的物镜；
- c) 调整样品俯仰与偏摆角度，使其尽可能与探测激光波前重合；
- d) 调整镜头与被测样品 Z 方向相对位置，使得样品表面进入最佳干涉位置；

- e) 选择测量区域，有效区域边长不小于 100 微米，区域数量不少于 5 处；
- f) 测量记录样品表面三维坐标数据，计算表面粗糙度 RMS 值。

7.8.3 高空间频率表面形貌误差测试

应使用原子力显微镜，按以下步骤进行测试：

- a) 按测试要求选择合适的探针；
- b) 按测试要求选择轻敲模式；
- c) 按测试要求选择合适的扫描范围；
- d) 根据相位图与误差图，调节 PID 参数，选择分子间作用力模式，获得最小的背景噪声；
- e) 选择测量区域，有效区域边长不小于 3 微米，区域数量不少于 3 处；
- f) 采集记录样品表面三维坐标数据，计算表面粗糙度 RMS 值。

7.9 环境适应性

7.9.1 高低温循环测试

按照GB/T 26331-2010中4.3的要求（严酷等级：02）进行测试。

将待测样品交替置于（ $-35^{\circ}\text{C}\pm 2^{\circ}\text{C}$ ）的低温环境和（ $63^{\circ}\text{C}\pm 2^{\circ}\text{C}$ ）的高温环境，每个周期中最高温度和最低温度保持时间均不少于2.5h，不同测试阶段间的温度变化率介于 $0.8^{\circ}\text{C}/\text{min}$ - $2^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ，测试的循环次数为5次。待所有周期结束后，温度恢复到标准大气条件下保持10min后测试结束。

高低温测试后的样品，其性能应仍满足最终用户的需求。

7.9.2 清洗测试

按照GB/T 26331-2010中4.8的要求进行测试。

将待测样品依次放入三氯乙烯（ C_2HCl_3 ）、丙酮（ CH_3COCH_3 ）、无水乙醇（ $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ ）中浸泡各10min，要求试剂均为分析纯试剂。在每种试剂中取出后，应让试剂自然挥发，直至没有目视可见的液迹存在，再放入下一种试剂。

清洗测试后的样品，其性能应仍满足最终用户的需求。

7.9.3 附着力测试

按照GB/T 26331-2010中4.10的要求（严酷等级：02）进行测试。

使用宽度12mm-13mm，剥离强度不小于6.86N（2cm宽）的胶带粘在膜层表面，以垂直于膜层表面方向的力沿胶带一端以约25mm/s的速度快速拉起。

附着力测试后的样品，其性能应仍满足最终用户的需求。

7.9.4 极低温测试

针对部分应用于极低温环境（可低至液氮温区）的超高反射率光学薄膜样品，根据应用需求选择目标的极低温温度，将待测样品置于目标温度的低温恒温器中，持续2h。

极低温测试后的样品，其性能应仍满足最终用户的需求。

7.9.5 伽马射线辐照测试

根据应用需求选择辐照剂量，使用伽马射线辐照薄膜样品。

伽马射线辐照测试后的样品，其性能应仍满足最终用户的需求。

7.9.6 电子辐照测试

按照GJB 2502.7-2006中的要求进行测试，根据应用需求选择辐照剂量。
电子辐照测试后的样品，其性能应仍满足最终用户的需求。

8 测试报告

测试报告应包含以下内容：

- a) 测试报告的唯一编号；
- b) 测试样品型号；
- c) 测试日期；
- d) 测试内容及要求；
- e) 测试仪器的型号和工作条件；
- f) 测试结果以及必要的结果说明；
- g) 测试人及审核人签字；
- h) 测试实验室的名称和单位地址；
- i) 测试报告页码。

测试报告参见附录

附录 A

(规范性)

光学谐振腔

A.1 光学谐振腔的稳定性

在进行基于光学谐振腔的超高反射率光学薄膜反射率、透射率和光学损耗测量时，选取的两面反射镜应满足光学谐振腔的稳定条件。定义 g 参数见公式(A.1) (A.2)。

$$g_1 = 1 - \frac{L}{R_1} \dots\dots\dots (A.1)$$

$$g_2 = 1 - \frac{L}{R_2} \dots\dots\dots (A.2)$$

式中：

g_1 ——反射镜1的 g 参数，无量纲；

g_2 ——反射镜2的 g 参数，无量纲；

L ——光学谐振腔的腔长，单位为米(m)；

R_1 ——反射镜1的曲率半径，单位为米(m)；

R_2 ——反射镜2的曲率半径，单位为米(m)。

对于平面镜，曲率半径趋于正无穷，在计算 g 参数时认为 $g = 1$ ；对于凹面镜，曲率半径记为正数；对于凸面镜，曲率半径记为负数。

在组成光学谐振腔时，选取的两面反射镜应满足腔的稳定条件见公式(A.3)。

$$0 \leq g_1 g_2 \leq 1 \dots\dots\dots (A.3)$$

式中：

g_1 ——反射镜1的 g 参数，无量纲；

g_2 ——反射镜2的 g 参数，无量纲。

A.2 光学谐振腔的横模

在进行基于光学谐振腔的超高反射率光学薄膜反射率、透射率和光学损耗测量时，需要将激光入射谐振腔内，并与谐振腔横模空间模式匹配。谐振腔的横模存在多阶，不同阶横模的频率见公式(A.4)。

$$\nu_{mnq} = \frac{c}{2L} \left(q + \frac{m+n+1}{\pi} \arccos \sqrt{g_1 g_2} \right) \dots\dots\dots (A.4)$$

式中：

ν_{mnq} ——TEM_{mnq}模式的频率，单位为赫兹(Hz)；

c ——真空中光速，单位为米每秒(m/s)；

L ——光学谐振腔的腔长，单位为米(m)；

q ——纵模序数，代表自由光谱区的数量，无量纲；

m ——横模序数，代表在 x 方向(或某一指定水平方向)的节线(光强为零的线)数量，无量纲；

n ——横模序数，代表在 y 方向(与 x 垂直的方向)的节线(光强为零的线)数量，无量纲；

g_1 ——反射镜1的 g 参数，无量纲；

g_2 ——反射镜2的 g 参数，无量纲。

测量中应将激光的频率设置在谐振腔的特定阶频率上,不同横模的高斯光束电场分布不同,以束腰面为例,其满足公式(A.5),绘制低阶横模的电场分布图如图A.1所示。应使用相机观测谐振腔透射光斑形状,以判断目前测量的横模模式。

$$E_{mn}(x,y) \propto H_m\left(\frac{\sqrt{2}x}{w_0}\right) H_n\left(\frac{\sqrt{2}y}{w_0}\right) e^{-\frac{x^2+y^2}{w_0^2}} \dots\dots\dots (A.5)$$

式中:

$E_{mn}(x,y)$ —— x,y 处的电场强度,单位为伏特每米(V/m);

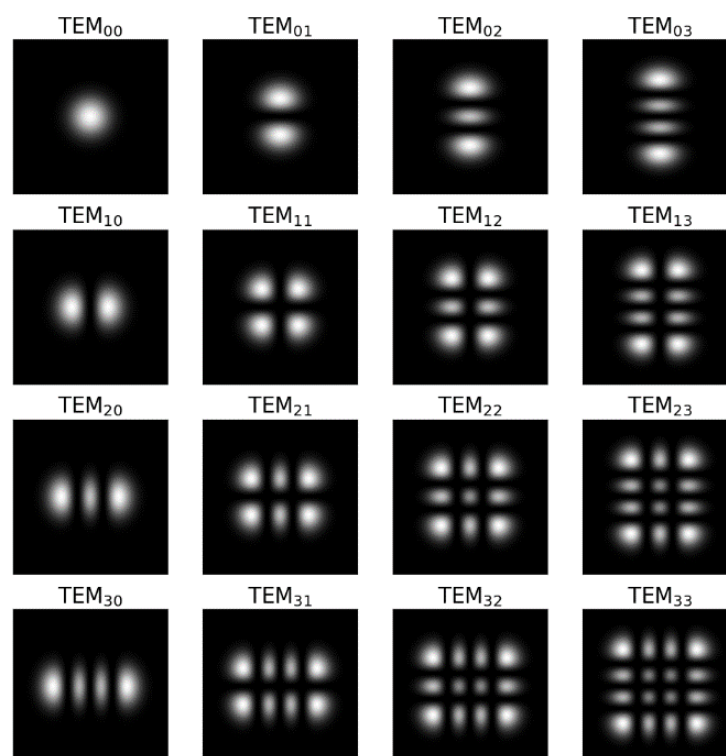
H_m ——参数为 m 的Hermite 多项式,无量纲;

H_n ——参数为 n 的Hermite 多项式,无量纲;

m ——横模序数,代表在 x 方向(或某一指定水平方向)的节线(光强为零的线)数量,无量纲;

n ——横模序数,代表在 y 方向(与 x 垂直的方向)的节线(光强为零的线)数量,无量纲;

w_0 ——光斑半径,单位为米(m)。



图A.1 TEM_m_n 高斯光束的截面光斑形状

A.3 光学谐振腔的纵模

在横模确定的条件下,光学谐振腔仅在满足往返相位为 2π 整数倍的离散频率处发生共振,这些沿频率轴等间隔分布的共振频率称为纵模。纵模频率间隔满足公式(A.6)。

$$\Delta\nu = \frac{c}{2L} \dots\dots\dots (A.6)$$

式中:

$\Delta\nu$ ——纵模频率间隔,单位为赫兹(Hz);

c ——真空中光速,单位为米每秒(m/s);

L ——光学谐振腔的腔长，单位为米（m）。

纵模频率间隔也被称为自由光谱范围（free spectral range, FSR），纵模的线宽用半高全宽（full width at half maximum, FWHM）表示，如公式（A.7）所示，其与组成光学谐振腔的反射镜的反射率有关。

$$\Gamma = \frac{c}{2\pi L} \frac{1 - \sqrt{R_1 R_2}}{\sqrt[4]{R_1 R_2}} \quad (\text{A. 7})$$

式中：

Γ ——纵模线宽，单位为赫兹（Hz）；

c ——真空中光速，单位为米每秒（m/s）；

L ——光学谐振腔的腔长，单位为米（m）；

R_1 、 R_2 ——分别为组成光学谐振腔的两面反射镜的功率反射率，无量纲。

公式（A.7）中有关反射率的部分常单独写作精细度（Finesse），如公式（A.8）所示：

$$Finesse = \frac{\pi(\sqrt[4]{R_1 R_2})}{1 - \sqrt{R_1 R_2}} \quad (\text{A. 8})$$

式中：

$Finesse$ ——精细度，FSR和纵模线宽的比值，无量纲；

R_1 、 R_2 ——分别为组成光学谐振腔的两面反射镜的反射率，无量纲。

A.4 光学谐振腔的振幅反射率

激光入射到光学谐振腔，反射光中有多个相位成分，相干叠加得到振幅反射率如公式（A.9）：

$$r(\omega) = \frac{r_1 - r_2 e^{i2\omega L/c}}{1 - r_1 r_2 e^{i2\omega L/c}} \quad (\text{A. 9})$$

式中：

$r(\omega)$ ——光学谐振腔对频率为 ω 的入射光的振幅反射率，无量纲；

ω ——激光角频率，单位为弧度每秒（rad/s）；

c ——真空中光速，单位为米每秒（m/s）；

L ——光学谐振腔的腔长，单位为米（m）；

r_1 、 r_2 ——分别为组成光学谐振腔的两面反射镜的振幅反射率，无量纲。

功率反射率如公式（A.10）：

$$F(\omega) = \frac{R_1 + R_2 - \sqrt{R_1 R_2} (e^{-i2\omega L/c} + e^{i2\omega L/c})}{1 + R_1 R_2 - \sqrt{R_1 R_2} (e^{-i2\omega L/c} + e^{i2\omega L/c})} \quad (\text{A. 10})$$

式中：

$F(\omega)$ ——光学谐振腔对频率为 ω 的入射光的功率反射率，无量纲；

ω ——激光角频率，单位为弧度每秒（rad/s）；

c ——真空中光速，单位为米每秒（m/s）；

L ——光学谐振腔的腔长，单位为米（m）；

R_1 、 R_2 ——分别为组成光学谐振腔的两面反射镜的功率反射率，无量纲；

附 录 B (规范性) 表面形貌误差

B.1 表面形貌误差的评定参数（原附录 B）

B.1.1 平均粗糙度

$$Ra = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| Z_i - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Z_i \right| \dots\dots\dots (B.1)$$

式中：

Ra ——平均粗糙度（averaged roughness），单位为米（m）；

Z_i —— i 点的高度，单位为米（m）；

N ——整个表面上的数据点数，无量纲。

B.1.2 均方根偏差粗糙度

$$RMS = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(Z_i - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Z_i \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \dots\dots\dots (B.2)$$

式中：

RMS ——均方根偏差粗糙度（root mean square deviation roughness），单位为米（m）；

Z_i —— i 点的高度，单位为米（m）；

N ——整个表面上的数据点数，无量纲。

B.1.3 峰谷值

$$PV = Z_{max} - Z_{min} \dots\dots\dots (B.3)$$

式中：

PV ——峰谷值（peak-to-valley value），单位为米（m）；

Z_{max} ——统计数据中的最大值，单位为米（m）；

Z_{min} ——统计数据中的最小值，单位为米（m）。

B.2 表面形貌误差的空间频率分类

针对不同的空间频率，表面形貌误差分为三类：低空间频率表面形貌误差、中空间频率表面形貌误差和高空间频率表面形貌误差，分类标准如表B.1所示。

表B.1 不同空间频率下的表面粗糙度

空间频率分类	分类标准
低空间频率	$<1\text{mm}^{-1}$
中空间频率	$1\text{-}1000\text{mm}^{-1}$
高空间频率	$>1000\text{mm}^{-1}$

B.3 表面形貌误差的空间频率积分范围

在得到样品表面三维坐标后，可获得样品表面高度分布函数 $z(x, y)$ 。

为避免整体面形对低空间频率分量的影响，应首先对测量得到的表面高度数据进行面形去除处理，随后对处理后的表面高度分布进行二维傅里叶变换，如公式（B.4）：

$$\tilde{z}(f_x, f_y) = \iint z(x, y) e^{-i2\pi(f_x x + f_y y)} dx dy \dots\dots\dots (B.4)$$

式中：

$\tilde{z}(f_x, f_y)$ ——表面高度二维傅里叶谱；

$z(x, y)$ ——表面高度分布函数，单位为米（m）；

f_x ——x方向的空间频率，单位为每米（m⁻¹）；

f_y ——y方向的空间频率，单位为每米（m⁻¹）。

根据公式（B.5），对表面高度二维傅里叶谱取模平方并做面积归一化，可得到表面高度的二维空间功率谱密度：

$$PSD_{2D}(f_x, f_y) = \frac{1}{A} |\tilde{z}(f_x, f_y)|^2 \dots\dots\dots (B.5)$$

式中：

$PSD_{2D}(f_x, f_y)$ ——表面高度二维空间功率谱密度；

A ——测量区域的面积，单位为平方米（m²）；

$\tilde{z}(f_x, f_y)$ ——表面高度二维傅里叶谱。

对于统计特性近似各向同性的表面，可将二维功率谱密度沿等空间频率圆环进行环向平均，从而得到仅与空间频率模长有关的一维空间功率谱密度，如公式（B.6）所示：

$$PSD(f) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} PSD_{2D}(f, \phi) d\phi \dots\dots\dots (B.6)$$

式中：

$PSD(f)$ ——表面高度一维空间功率谱密度；

$PSD_{2D}(f_x, f_y)$ ——表面高度二维空间功率谱密度；

f ——空间频率模长，单位为每米（m⁻¹）；

ϕ ——空间频率平面内的方位角，单位为弧度（rad）。

公式（B.6）中空间频率模长 f 与二维空间频率分量 f_x 和 f_y 的关系如公式（B.7）所示：

$$f = \sqrt{f_x^2 + f_y^2} \dots\dots\dots (B.7)$$

式中：

f ——空间频率模长，单位为每米（m⁻¹）；

f_x ——x方向的空间频率，单位为每米（m⁻¹）；

f_y ——y方向的空间频率，单位为每米（m⁻¹）。

得到一维空间功率谱密度 $PSD(f)$ 后，对其与空间频率 f 的乘积在特定空间频段 f_1 、 f_2 内做积分并开根号，可得到特定空间频段内的表面粗糙度，如公式（B.8）：

$$RMS = \sqrt{2\pi \cdot \int_{f_1}^{f_2} [PSD(f) \cdot f] df} \dots\dots\dots (B.8)$$

式中：

RMS ——均方根偏差粗糙度，单位为米（m）；

f_1 ——积分下限，单位为每米（m⁻¹）；

f_2 ——积分上限，单位为每米（m⁻¹）；

$PSD(f)$ ——表面高度一维空间功率谱密度。

积分下限 f_1 和积分上限 f_2 的选取与波长有关，分别满足公式（B.9）和公式（B.10）：

$$f_1 = \frac{\sin\theta_{min}}{\lambda} \dots\dots\dots (B. 9)$$

$$f_2 = \frac{1}{\lambda} \dots\dots\dots (B. 10)$$

式中：

f_1 ——积分下限，单位为每米（ m^{-1} ）；

f_2 ——积分上限，单位为每米（ m^{-1} ）；

θ_{min} ——最小散射角，单位为角度（ $^{\circ}$ ）；

λ ——波长，单位为米（ m ）。

参考ISO 13696给出的散射范围定义，散射角在 3° 到 85° 之间，故取 $\theta_{min} = 3^{\circ}$ 。

附 录 C

(规范性)

标准反射镜的反射率、透射率和光学损耗、吸收率标定方法

C.1 标准反射镜的反射率标定方法（原附录 G）

按附录A.1对光学谐振腔的稳定性要求，选取可两两组成稳定光学谐振腔的三个反射镜。将三个反射镜两两组成光学谐振腔进行光腔衰荡反射率测量，得到 R_1R_2 、 R_2R_3 、 R_3R_1 三个数值，再求解方程组可以计算得到 R_1 、 R_2 和 R_3 ，即三个反射镜的反射率都可以严格求解。

考虑到实验测量的误差，要求作为标准反射镜的反射镜反射率应大于99.999%。

注：对于数量较多（>3个）的预期性能相近的待测反射镜样品，也可从中选择进行两两组合的测试并直接得到结果，不需要进行标准反射镜的标定和使用。

C.2 标准反射镜的透射率和光学损耗标定方法

按附录A.1对光学谐振腔的稳定性要求，选取反射率已知的可组成稳定光学谐振腔的两个待标定标准反射镜。分别从两个待标定标准反射镜入射激光，测量每一组的腔后透射功率比 I_b/I_a 和腔前反射功率比 I_c/I_a ，联立得到方程组，求解得到待标定标准反射镜的透射率和光学损耗。

表C.1 标准反射镜的透射率和光学损耗标定符号定义

符号	物理含义	单位
I_a	入射光学谐振腔前的激光功率	瓦（W）
I_b	出射光学谐振腔后的激光功率	瓦（W）
I_c	光学谐振腔前反射的激光功率	瓦（W）
β	激光通过电光调制器后载波占载波和边带总光功率的比值	无量纲
η	入射激光和光学谐振腔的耦合效率	无量纲
R_1	待标定标准反射镜1的反射率	无量纲
T_1	待标定标准反射镜1的透射率	无量纲
L_1	待标定标准反射镜1的光学损耗	无量纲
R_2	待标定标准反射镜2的反射率	无量纲
T_2	待标定标准反射镜2的透射率	无量纲
L_2	待标定标准反射镜2的光学损耗	无量纲

从待标定标准反射镜1入射，待标定标准反射镜2出射，锁频后测量腔后透射功率比 I_{b1}/I_{a1} 和腔前反射功率比 I_{c1}/I_{a1} ，得到公式（C.1）和（C.2）：

$$\frac{I_{b1}}{I_{a1}} = \beta \eta_1 \frac{4T_1T_2}{(T_1+T_2+L_1+L_2)^2} \dots\dots\dots (C.1)$$

$$\frac{I_{c1}}{I_{a1}} = \beta \eta_1 \frac{(R_1-R_2+2L_1)^2}{(T_1+T_2+L_1+L_2)^2} + \beta(1-\eta_1) + (1-\beta) \dots\dots\dots (C.2)$$

从待标定标准反射镜2入射，待标定标准反射镜1出射，锁频后测量腔后透射功率比 I_{b2}/I_{a2} 和腔前反射功率比 I_{c2}/I_{a2} ，得到公式（C.3）和（C.4）：

$$\frac{I_{b2}}{I_{a2}} = \beta \eta_2 \frac{4T_1T_2}{(T_1+T_2+L_1+L_2)^2} \dots\dots\dots (C.3)$$

$$\frac{I_{c2}}{I_{a2}} = \beta \eta_2 \frac{(R_2 - R_1 + 2L_2)^2}{(T_1 + T_2 + L_1 + L_2)^2} + \beta(1 - \eta_2) + (1 - \beta) \dots\dots\dots (C. 4)$$

联立公式 (C. 1) ~ (C. 6) 求解得到待标定标准反射镜的透射率和光学损耗。

$$R_1 + L_1 + T_1 = 1 \dots\dots\dots (C. 5)$$

$$R_2 + L_2 + T_2 = 1 \dots\dots\dots (C. 6)$$

考虑到实验测量的误差，要求作为标准反射镜的反射镜透射率应大于1ppm。

注：对于数量较多（>3个）的预期性能相近的待测反射镜样品，也可以从中选择进行两两组合的测试并直接得到结果，而不需要进行标准反射镜的标定和使用。

C. 3 标准反射镜的吸收损耗标定方法

标准样品的吸收率通过GB/T 38245-2019规范的热量法精准标定。

考虑到实验测量的误差，要求标准样品在工作波段的吸收率在10ppm到100ppm之间。标准样品与待测样品应具有相同或经修正的基底材料、厚度、表面形态和测量几何。

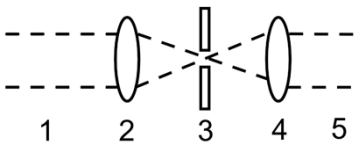
附 录 D
(资料性)
散射损耗测量的光学系统

D.1 概述

散射损耗测量的光学系统通常可分为光源及光束处理（空间滤波）系统、样品姿态调整系统和散射光探测系统。光源组件及光束处理（空间滤波）系统用于形成具有规定空间质量、光斑尺寸、发散角和入射方向的照明光束；样品姿态调整系统用于实现规定入射几何条件下的反射、透射或散射；散射光探测系统用于按照测量方法的要求收集散射光。对于积分球测量法，散射光通常由积分球进行空间积分收集，不需要角分辨散射光探测系统；对于角分辨散射测量法，应配置能够定义接收方向、接收立体角和视场范围的角分辨接收系统。

D.2 光源及光束处理系统

应用于散射损耗的探测激光应覆盖待测样品的工作波段，并准直输出后进行空间滤波，以获得近似点光源并滤除高频噪声和离轴杂散光。光束处理（空间滤波）系统通常由前级透镜、小孔、后级透镜组成。前级透镜将来自光源的光束聚焦到小孔位置；小孔设置在前级透镜形成的聚焦光斑位置，用于限制通过该位置的空间光束成分，滤除离轴杂散光和高频噪声；后级透镜再将通过小孔的光重新准直扩束到后续测量光路中。



- 标引序号说明：
- | | |
|------------|------------|
| 1——入射准直激光； | 4——后级透镜； |
| 2——前级透镜； | 5——输出准直激光。 |
| 3——滤波小孔； | |

图D.1 空间滤波系统框图

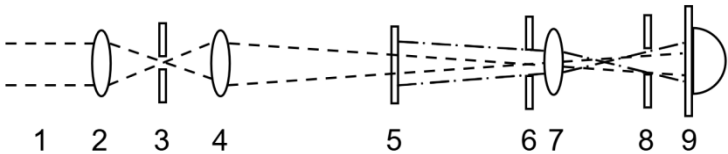
当入射激光为准直高斯光束时，被前级透镜聚焦后的光斑半径可以根据公式（D.1）估算：

$$w_0 \approx \frac{2M^2\lambda f_1}{\pi D} \dots\dots\dots (D.1)$$

- 式中：
- w_0 ——光斑半径，单位为米（m）；
 - M^2 ——光束质量因子，理想基模为1，无量纲；
 - λ ——激光波长，单位为米（m）；
 - f_1 ——前级透镜的焦距，单位为米（m）；
 - D ——入射到前级透镜上的光束直径，单位为米（m）。

建议选取滤波小孔的直径为会聚光斑直径的2倍~4倍，更小的小孔可以得到更强的滤波效果，更大的小孔可以得到更高的光通量。经过光束滤波系统后的激光应当满足远场光斑形貌对称、无明显切光、无明显离轴杂散光和传播方向稳定等要求。

D.3 角分辨散射光探测



- 标引序号说明：
- | | |
|------------|----------|
| 1——入射准直激光； | 6——孔径光阑； |
| 2——前级透镜； | 7——成像透镜； |
| 3——滤波小孔； | 8——视场光阑； |
| 4——后级透镜； | 9——探测器。 |
| 5——待测样品； | |

图D.2 角分辨散射光探测系统框图

经过空间滤波系统后的光束，可以是准直的，也可以是会聚的，并且可以聚焦在孔径光阑处，也可以聚焦在样品处。孔径光阑的面积及其与样品之间的距离决定了散射光探测的收集立体角 Ω 。

成像透镜将样品成像到视场光阑上。视场光阑的尺寸决定探测器的视场范围。探测器位于视场光阑后方。对于采用绝对归一化方法的测量系统而言，这种光学设计是最常见的，因为计算立体角所需的信息较容易获得，并且可以进行距离补偿。对于基于激光的测量系统，这也是最常用的设计，因为它的杂散光来源最少，而且激光的低发散角通常不需要额外光学元件来控制光束。

收集立体角可根据公式（D.2）估算：

$$\Omega \approx \frac{\pi d^2}{4L^2} \dots \dots \dots (D.2)$$

- 式中：
- Ω ——收集立体角，单位为球面度（sr）；
 - d ——孔径光阑直径，单位为米（m）；
 - L ——样品测量点到孔径光阑的距离，单位为米（m）。

接收孔径尺寸和样品至接收孔径距离共同决定角分辨能力和接收信号强度。较小的接收孔径或较大的接收距离可以提高角分辨能力，但会降低接收光功率；较大的接收孔径或较小的接收距离可以提高信号强度，但会降低角分辨能力。接收孔径的选取应综合考虑散射信号强度、探测器噪声、角分辨率和测量重复性。

视场光阑设置在接收成像光路中，用于限定样品上的有效观测区域。有效观测区域应覆盖入射光斑所在区域，并避免接收来自样品边缘、夹具、支架或其他非测量区域的散射光。若采用接收透镜将样品表面成像至视场光阑处，则样品上的有效观测尺寸可根据视场光阑尺寸和接收成像系统放大率确定。视场范围过小可能导致入射光斑部分被截断，视场范围过大则可能引入非测量区域杂散光。

附 录 E

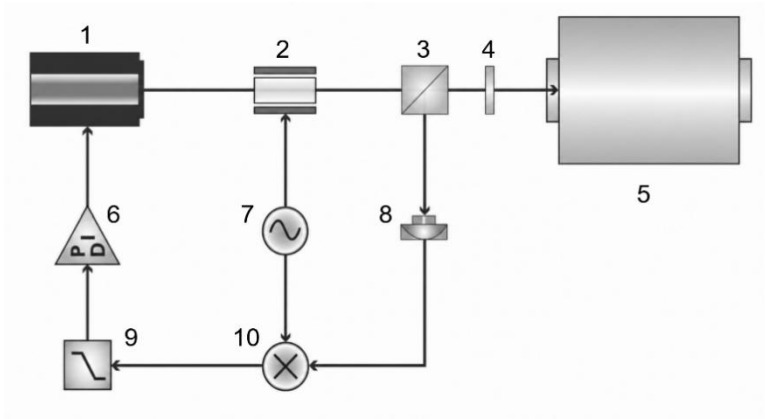
(资料性)

PDH 锁频原理

E.1 概述

在透射率和光学损耗标定中,需要进行激光频率到光学谐振腔频率的锁定,以得到稳定真实的透射率和光学损耗数值。常用的频率锁定技术为PDH (pound-drever-hall) 锁频技术,是一种通过相位调制结合光学谐振腔反射特性实现激光频率锁定的主动稳频方法。该技术利用电光或声光调制器对入射光进行相位调制,通过检测反射光信号与射频参考信号的混频误差,生成与激光频率偏移量成正比的误差信号,经伺服系统反馈控制激光器实现频率稳定。

E.2 技术原理



- 标引序号说明:
- 1——可调谐激光器;

2——电光调制器;

3——偏振分束器;

4——四分之一波片;

5——光学谐振腔;

6——PID控制器;

7——信号发生器;

8——光电探测器;

9——低通滤波器;

10——混频器。

图E.1 PDH 锁频系统框图

如图E.1所示,假定激光器出射频率为 ω ,强度为 E_0 的激光,经过电光调制器调制后,产生调制边带,在忽略高阶小量的条件下,其光场表达式见公式 (E.1) :

$$E = E_0[J_0(\beta)e^{i\omega t} + J_1(\beta)e^{i(\omega+\Omega)t} - J_1(\beta)e^{i(\omega-\Omega)t}] \dots\dots\dots (E. 1)$$

- 式中:
- E ——激光的电场幅度,单位为伏特每米 (V/m) ;

E_0 ——激光的电场幅值,单位为伏特每米 (V/m) ;

β ——调制深度,无量纲;

J_0 ——0阶贝塞尔函数,无量纲;

J_1 ——1阶贝塞尔函数,无量纲;

$e^{i\omega t}$ ——光场的时间相位因子,无量纲;

ω ——光场角频率，单位为弧度每秒（rad/s）；
 Ω ——调制角频率，单位为弧度每秒（rad/s）；
 t ——时间，单位为秒（s）；
 i ——虚数单位，无量纲。

被相位调制的光信号进入光学谐振腔后，其反射光场与公式（A.9）有关。经过偏振分束器和四分之一波片的组合，使得反射光的线偏振态与入射光垂直，在经过偏振分束器时通向垂直方向以实现分光，并被光电探测器接收，光电探测器上的信号可以用公式（E.2）描述：

$$P_{ref} = E_0^2 [|r(\omega)|^2 J_0^2(\beta) + |r(\omega + \Omega)|^2 J_1^2(\beta) + |r(\omega - \Omega)|^2 J_1^2(\beta)] \\ + 2E_0^2 J_0(\beta) J_1(\beta) \text{Re}[r(\omega)r^*(\omega + \Omega) - r^*(\omega)r(\omega - \Omega)] \cos \Omega t \\ + 2E_0^2 J_0(\beta) J_1(\beta) \text{Im}[r(\omega)r^*(\omega + \Omega) - r^*(\omega)r(\omega - \Omega)] \sin \Omega t + O(2\Omega) \dots\dots\dots (E. 2)$$

式中：

P_{ref} ——光电探测器接收到的光电信号，单位为瓦特（W）；
 E_0 ——激光的电场幅值，单位为伏特每米（V/m）；
 r ——光学谐振腔对特定频率入射光的振幅反射率，无量纲；
 β ——调制深度，无量纲；
 J_0 ——0阶贝塞尔函数，无量纲；
 J_1 ——1阶贝塞尔函数，无量纲；
 ω ——光场角频率，单位为弧度每秒（rad/s）；
 Ω ——调制角频率，单位为弧度每秒（rad/s）；
 t ——时间，单位为秒（s）；
 $O(2\Omega)$ ——包含参数为 2Ω 的二阶小量；

使用与电光调制器调制信号同频的信号进行解调，并进行低通滤波，在解调信号与调制信号相位相同或相反时，得到最大的鉴频斜率。当调制频率远大于线宽时，化简的误差信号形式见公式（E.3）：

$$\varepsilon = -\frac{8kE_0^2 J_0 J_1}{\Gamma} \delta\nu \dots\dots\dots (E. 3)$$

式中：

ε ——误差信号，单位为伏特（V）；
 k ——光电探测器的光电转换系数和混频器解调系数的乘积，单位为伏特每瓦（V/W）；
 E_0 ——激光的电场幅值，单位为伏特每米（V/m）；
 J_0 ——0阶贝塞尔函数，无量纲；
 J_1 ——1阶贝塞尔函数，无量纲；
 Γ ——纵模线宽，单位为赫兹（Hz）；
 $\delta\nu$ ——激光频率与光学谐振腔频率的差值，单位为赫兹（Hz）；

由于误差信号和频率偏移量为过零点的近似正比例关系，故可以依此建立负反馈机制实现激光频率到光学谐振腔频率的锁定。

附录 F
(资料性)
测试报告

F.1 反射率

测试机构		样品编号	
测试日期		测试员	
测试方法	☐ 光关断式光腔衰荡测量		
	☐ 快速扫频光腔衰荡测量		
测试波长		测试偏振态	
测试横模		探测器响应时间	
样品曲率半径		标片曲率半径	
测试腔长		测试腔衰荡时间	
腔衰荡信号及相应最佳拟合图：		横模相机照片：	
测试样品反射率			

F.2 透射率和光学损耗

测试机构		样品编号	
测试日期		测试员	
测试波长		测试偏振态	
样品曲率半径		样品反射率	
标片反射率		标片透射率	
标片光学损耗		测试腔长	
测试横模		横模相机照片：	
入射腔前功率			
出射腔后功率			
腔前反射功率			
真空腔窗口总透过率			
载波占总能量比值			
测试样品透射率			

测试样品光学损耗	
----------	--

F.3 吸收损耗

测试机构		样品编号	
测试日期		测试员	
测试方法	☐ 光热透镜测量法	☐ 反射式	
	☐ 光热偏转测量法	☐ 透射式	
泵浦激光信息			
波长		偏振态	
样品表面光斑半径		调制频率	
平均功率		功率稳定性	
入射角			
探测激光信息			
波长		偏振态	
样品表面光斑半径		入射角	
测试结果			
标样的光热信号幅值		样品的的光热信号幅值	
样品的吸收率			
光热吸收分布测量图像：			
成像面积		扫描步长	

F.4 散射损耗

测试机构		样品编号	
测试日期		测试员	
测试方法	☐ 积分球总散射测量法		
	☐ 角分辨散射测量法		
光源波长		光源偏振态	
光源功率		光斑直径	
入射角		标准散射白板编号	
测试样品散射损耗			

F.5 布朗热噪声机械损耗

测试机构		样品编号	
测试日期		测试员	
未镀膜衬底测试		镀膜衬底测试	
衬底厚度		镀膜厚度	
衬底弹性能		镀膜弹性能	
测试温度		测试温度	
测试真空度		测试真空度	
测试频率	未镀膜衬底机械损耗	测试频率	镀膜衬底机械损耗
1.	1.	1.	1.
2.	2.	2.	2.
3.	3.	3.	3.
4.	4.	4.	4.
镀膜机械损耗			
测试频率		镀膜机械损耗	
1.		1.	
2.		2.	
3.		3.	
4.		4.	

F.6 反射光谱

测试机构		样品编号	
测试日期		测试员	
测试方法	☐ 分光光度计法		
	☐ 傅里叶变换红外光谱仪法		
光谱范围		光源偏振态	
入射角度		探测器角度	
反射光谱图像：			

F.7 透射光谱

测试机构		样品编号	
测试日期		测试员	
测试方法	☐ 分光光度计法		
	☐ 傅里叶变换红外光谱仪法		

光谱范围		光源偏振态	
入射角度		探测器角度	
透射光谱图像：			

F.8 表面形貌误差

测试机构		样品编号	
测试日期		测试员	
低空间频率表面形貌误差测量			
测量设备型号			
参考镜曲率半径			
光源波长			
表面三维坐标图像：			
PV 值		RMS 值	
中空间频率表面形貌误差测量			
测量设备型号			
物镜型号			
物镜放大倍数			
表面三维坐标图像：			
PV 值		RMS 值	
高空间频率表面形貌误差测量			
测量设备型号			
探针型号			
探针工作频率			
表面三维坐标图像：			

Ra 值		RMS 值	

F.9 环境适应性

测试机构		样品编号	
测试日期		测试员	
测试项目	参考国标	是否达标	
附着力测试	GB/T 26331-2010	☐ 是	☐ 否
高低温循环测试	GB/T 26331-2010	☐ 是	☐ 否
清洗测试	GB/T 26331-2010	☐ 是	☐ 否
超低温测试		☐ 是	☐ 否
伽马射线辐照测试		☐ 是	☐ 否
电子辐照测试	GJB 2502.7-2006	☐ 是	☐ 否

参 考 文 献

- [1] GB/T 37412—2019. 激光器和激光相关设备 光腔衰荡反射率测量方法
- [2] GB/T 44605—2024. 激光器和激光相关设备 激光光学元件吸收分布测量 光热成像法
- [3] Chung T H, Zou X L, Zhang Q H, et al. Ultrahigh-reflective optical thin films prepared by reactive magnetron sputtering with RF-induced substrate bias[J]. Review of Scientific Instruments, 2024, 95(4): 045107.
- [4] Chen Z A, Zeng H R, Wang W W, et al. A laser with instability reaching 4×10^{-17} based on a 10-cm-long silicon cavity at sub-5-K temperatures[J]. Science Bulletin, 2025, 70(20): 3337-3344.
- [5] Deck L. High precision interferometer for measuring mid-spatial frequency departure in free form optics[C]//Proceedings of SPIE. Optical Manufacturing and Testing VII. Bellingham: SPIE, 2007: 103160N.
- [6] Dinger U, Eisert F, Lasser H, et al. Mirror substrates for EUV lithography: progress in metrology and optical fabrication technology[C]//Proceedings of SPIE. Soft X-Ray and EUV Imaging Systems. Bellingham: SPIE, 2000: 4146.
-