

# 《量子技术 超高反射率光学薄膜性能表征及测量方法》

## 国家标准编制说明

(征求意见稿)

2026年6月30日

# 目录

|                                                         |    |
|---------------------------------------------------------|----|
| 一、工作简况 .....                                            | 1  |
| 二、国家标准编制原则、主要内容及其确定依据 .....                             | 7  |
| 三、试验验证的分析、综述报告，技术经济论证，预期的经济效益、社会效益和生态效益 .....           | 10 |
| 四、与国际、国外同类标准技术内容的对比情况 .....                             | 11 |
| 五、以国际标准为基础的的起草情况，以及是否合规引用或者采用国际国外标准，并说明未采用国际标准的原因 ..... | 12 |
| 六、与有关法律、行政法规及相关标准的关系 .....                              | 12 |
| 七、重大分歧意见的处理经过和依据 .....                                  | 12 |
| 八、涉及专利的有关说明 .....                                       | 12 |
| 九、实施国家标准的要求，以及组织措施、技术措施、过渡期和实施日期的建议等措施建议 .....          | 12 |
| 十、其他应当说明的事项 .....                                       | 13 |
| 附件：《量子技术 超高反射率光学薄膜性能表征及测量方法》实验测试报告 .....                | 15 |

## 一、工作简况

### （一）任务来源

2025 年 10 月 5 日，国家标准化管理委员会发布《关于下达 2025 年第九批推荐性国家标准计划及相关标准外文版计划的通知》（国标委发〔2025〕52 号），下达了《量子精密测量用超高反射率光学薄膜性能表征及测量方法》推荐性国家标准的制定任务，计划号：20255414-T-469，任务周期 18 个月。本标准由全国量子技术标准化技术委员会（SAC/TC 578）提出并归口管理，起草单位包括中国科学技术大学、合肥国家实验室、中国计量科学研究院、北京大学、电子科技大学、中国计量大学、山西大学、济南量子技术研究院等共同负责标准起草。其中，中国科学技术大学为该标准起草工作的牵头单位。

### （二）制定背景

在国家顶层布局和相关部委的大力支持下，我国量子科技正处于从基础研究突破向工程化、产业化和标准化协同推进的关键阶段，急需标准化工作的系统支撑。《国家标准化发展纲要》将“推动标准化与科技创新互动发展”作为重点任务，明确提出在人工智能、量子信息、生物技术等领域开展标准化研究，并在新兴产业、未来产业领域开展标准化研究、制定一批应用带动的新标准。2025 年政府工作报告进一步提出，因地制宜发展新质生产力，加快建设现代化产业体系，建立未来产业投入增长机制，培育生物制造、量子科技、

具身智能、6G 等未来产业。上述政策部署为量子科技领域关键共性技术标准研制提供了明确方向。

超高反射率光学薄膜是量子精密测量系统中的关键基础器件，广泛服务于超稳光学参考腔、光学原子钟、精密光谱、引力波探测、量子传感等高端装备和科学装置。其反射率、透射率、光学损耗、吸收损耗、散射损耗、表面形貌误差以及布朗热噪声机械损耗等性能，直接影响光学谐振腔的精细度、频率稳定度等核心指标。随着量子精密测量系统向更高稳定度、更低噪声和更高环境适应性发展，亟需建立统一、可重复、可溯源的超高反射率光学薄膜性能表征及测量方法，为相关材料、工艺、器件和系统应用提供标准化评价依据。

### （三）起草过程

2024 年 11 月 20 日，中国科学技术大学、合肥国家实验室联合济南量子技术研究院成立前期工作组，启动《量子精密测量用超高反射率光学薄膜性能表征及测量方法》标准的起草准备工作；2025 年 3 月 25 日，前期工作组向全国量子技术标准化技术委员会（SAC/TC578）提交了标准的立项申报材料；2025 年 6 月 20 日，TC578 全体委员投票表决通过立项申请（委员总数 58 人、参与 51 人、同意 51 人、反对 0 人、弃权 0 人）；2025 年 7 月 8 日，完成立项答辩；2025 年 7 月 15 日，完成立项评估；2025 年 7 月 25 日，完成项目审核并进行网上公示；2025 年 9 月 24 日，完成立项公示。

2025 年 10 月 5 日，国家标准化管理委员会批准立项申请，正式下达《量子精密测量用超高反射率光学薄膜性能表征及测量方法》推荐性国家标准的制定任务，计划号：20255414-T-469，任务周期 18 个月。任务下达后，技术归口单位全国量子技术标准化技术委员会，会同项目牵头单位中国科学技术大学，面向领域内相关科研院所、企事业单位、社会团体等，广泛开展了标准编写工作组成员单位/起草专家的征集工作。

2025 年 12 月 17 日，《量子精密测量用超高反射率光学薄膜性能表征及测量方法》国家标准编写工作组正式成立。起草工作组由来自中国科学技术大学、合肥国家实验室、中国计量科学研究院、济南量子技术研究院等共 31 个单位的 27 名专家构成。霍永恒教授任组长，组员有甘海勇、钟东勳、张熙博、戴汉宁、郑耀辉、胡水明、孙青、邓淞文等。国家标准启动会暨第 1 次工作组会议在济南量子技术研究院召开，为“线上线下结合”的会议方式。会议由标准第一起草人中国科学技术大学霍永恒教授主持，中国科学技术大学、合肥国家实验室、中国计量科学研究院、北京大学、山西大学、中国计量大学、济南量子技术研究院、北京航天时代激光导航技术有限公司等 12 家单位的 17 位专家出席。会议进行了编写工作任务分工，制定了编写工作计划，并要求各单位对标准草案进行意见反馈。本次会议共收到北京航天时代激光导航技术有限公司、中国计量科学研究院、北京大学、济南量子技术研究院等单位提出的修改意见 40 条。

2025 年 12 月，工作组认真研究并完成了对 40 条意见的修改，形成标准草案(20251225 版)，并将标准草案(20251225 版)发送给工作组全体成员单位。

2026 年 3 月 13 日，工作组召开第 2 次工作组会，本次为线上会议，由第一起草人中国科学技术大学霍永恒教授主持，中国科学技术大学、合肥国家实验室、济南量子技术研究院、中国计量科学研究院、电子科技大学、山西大学、中国计量大学、成都速派光学技术有限公司等 8 家单位的 13 位专家出席。会议首先介绍了起草工作组针对征求意见的逐条回应和相应的修改结果，随后针对标准草案(20251225 版)的内容再次逐条讨论，征询意见。会议共收到修改意见 21 条。

2026 年 3 月，工作组完成对第 2 次工作组会收集的修改意见处理，形成标准草案(20260324 版)，并将标准草案(20260324 版)发送给工作组全体成员单位。

2026 年 5 月 14 日，工作组召开第 3 次工作组会，本次为“线上线下结合”的会议方式。会议由第一起草人中国科学技术大学霍永恒教授主持，中国科学技术大学、合肥国家实验室、山西大学、北京大学等 9 家单位的 10 位专家出席。会议介绍了起草工作组针对征求意见的逐条回应和相应的修改结果，随后针对标准草案(20260506 版)的内容再次逐条讨论，征询意见。

2026 年 5 月，工作组完成对第 3 次工作组会收集的修改意见处理，形成标准草案（20260516 版），并将标准草案（20260516 版）发送给工作组全体成员单位。

2026 年 6 月 30 日，工作组召开第 4 次工作会议，为线上会议。会议由第一起草人中国科学技术大学霍永恒教授主持，周均铭、郑耀辉、钟东勳、张萌等专家出席。会上，工作组全体成员代表所属单位投票表决，投票结果同意对工作组讨论稿修改完善后，形成征求意见稿和征求意见稿编制说明，向 TC578 标委会秘书处提交。投票情况：应参加投票专家 32 人，实际参加投票专家 32 人，同意 32 人，反对 0 人，弃权 0 人。

#### （四）国家标准主要起草人及其所做的工作

本标准由中国科学技术大学作为牵头单位，合肥国家实验室、北京大学、电子科技大学、中国计量科学研究院、济南量子技术研究院等单位共同负责标准起草。主要起草人员及其工作如下表 1：

表 1 标准起草人员及主要工作

| 序号 | 姓名  | 单位       | 联系方式                 | 主要工作                                                                             |
|----|-----|----------|----------------------|----------------------------------------------------------------------------------|
| 1  | 霍永恒 | 中国科学技术大学 | yongheng@ustc.edu.cn | 牵头标准预研，负责标准制定全面工作，包括起草标准初稿，制定和推进工作计划、文件收集、提出标准整体框架和主要技术内容，组织标准关键技术验证，参与讨论、提供意见建议 |
| 2  | 张熙博 | 北京大学     | xibo@pku.edu.cn      | 参与标准预研，起草标准与编制说明，组织标准关键技术验证，参与讨论、提供意见和建议                                         |
| 3  | 李斌成 | 电子科技大学   | bcli@uestc.edu.cn    | 参与标准预研，起草标准与编制说明，组织标准关键技术验证，参与讨论、提供意见和建议                                         |

|    |     |                    |                          |                                                               |
|----|-----|--------------------|--------------------------|---------------------------------------------------------------|
| 4  | 廖荣  | 中国科学技术大学           | lr_ustc@mail.ustc.edu.cn | 工作组秘书，参与标准预研，起草标准与编制说明，组织标准关键技术验证，组织工作组会议与标准草案修订，参与讨论、提供意见和建议 |
| 5  | 黄智强 | 成都速派光学技术有限公司       | hzq@superoptics.cn       | 参与标准预研，起草标准与编制说明，组织标准关键技术验证，参与讨论、提供意见和建议                      |
| 6  | 甘海勇 | 中国计量科学研究院          | ganhaiyong@nim.ac.cn     | 参与标准预研，起草标准与编制说明，参与讨论、提供意见和建议                                 |
| 7  | 胡水明 | 中国科学技术大学           | smhu@ustc.edu.cn         | 参与标准预研，起草标准与编制说明，参与讨论、提供意见和建议                                 |
| 8  | 孙青  | 中国计量科学研究院          | sunqing@nim.ac.cn        | 参与标准预研，起草标准与编制说明，参与讨论、提供意见和建议                                 |
| 9  | 马维光 | 山西大学               | mwg@sxu.edu.cn           | 参与标准预研，起草标准与编制说明，参与讨论、提供意见和建议                                 |
| 10 | 谭爱红 | 中国计量大学             | tanah@cjlu.edu.cn        | 参与标准预研，起草标准与编制说明，参与讨论、提供意见和建议                                 |
| 11 | 章光建 | 北京航天时代激光导航技术有限责任公司 | zhanggj-yyj@163.com      | 参与标准预研，起草标准与编制说明，参与讨论、提供意见和建议                                 |
| 12 | 钟东勳 | 合肥国家实验室            | thchung@hfnl.cn          | 参与标准预研，起草标准与编制说明，参与讨论、提供意见和建议                                 |
| 13 | 徐凭  | 中国科学技术大学           | xpsophia@ustc.edu.cn     | 参与标准预研，起草标准与编制说明，参与讨论、提供意见和建议                                 |
| 14 | 戴汉宁 | 中国科学技术大学           | daihan@ustc.edu.cn       | 参与标准预研，起草标准与编制说明，参与讨论、提供意见和建议                                 |
| 15 | 陈宇翱 | 中国科学技术大学           | yuaochen@ustc.edu.cn     | 参与标准预研，起草标准与编制说明，参与讨论、提供意见和建议                                 |
| 16 | 王超凡 | 济南量子技术研究院          | wangchaofan@jiqt.org     | 参与标准预研，提供标准工作指导，标准专业技术内容审核，参与讨论、提供意见和建议                       |
| 17 | 王胭脂 | 中国科学院上海光学精密机械研究所   | yanzhiwang@simom.ac.cn   | 参与讨论、提供意见和建议                                                  |
| 18 | 郑耀辉 | 山西大学               | yhzheng@sxu.edu.cn       | 参与讨论、提供意见和建议                                                  |
| 19 | 邓淞文 | 中国科学院大连化学物理研究所     | dengsongwen@dicp.ac.cn   | 参与讨论、提供意见和建议                                                  |
| 20 | 张萌  | 中国标准化研究院           | zhangmeng@caict.ac.cn    | 参与讨论、提供意见和建议                                                  |
| 21 | 周均铭 | 埃特曼半导体技术有限公司       | zhoujunming@atoman.cc    | 参与讨论、提供意见和建议                                                  |
| 22 | 王旭光 | 埃特曼半导体技术有限公司       | wangxuguang@atoman.cc    | 参与讨论、提供意见和建议                                                  |

|    |     |                |                            |              |
|----|-----|----------------|----------------------------|--------------|
| 23 | 郭强强 | 中国计量科学研究院      | guoqq@nim.ac.cn            | 参与讨论、提供意见和建议 |
| 24 | 颜立新 | 清华大学           | yanlx@mail.tsinghua.edu.cn | 参与讨论、提供意见和建议 |
| 25 | 彭小强 | 中国人民解放军国防科技大学  | pxq2000@vip.sina.com       | 参与讨论、提供意见和建议 |
| 26 | 张志强 | 合肥国家实验室        | zhang-zhiqiang@ustc.edu.cn | 参与讨论、提供意见和建议 |
| 27 | 张锦龙 | 同济大学           | jinlong@tongji.edu.cn      | 参与讨论、提供意见和建议 |
| 28 | 张安宁 | 北京理工大学         | Anningzhang@bit.edu.cn     | 参与讨论、提供意见和建议 |
| 29 | 李刚  | 中国科学院大连化学物理研究所 | lig@dicp.ac.cn             | 参与讨论、提供意见和建议 |
| 30 | 劳长石 | 深圳朗朗智能科技有限公司   | allen@langer3d.com         | 参与讨论、提供意见和建议 |
| 31 | 孙超伟 | 河南省科学院         | cwsun@hnas.ac.cn           | 参与讨论、提供意见和建议 |
| 32 | 徐红星 | 河南省科学院         | hxxu@hnas.ac.cn            | 参与讨论、提供意见和建议 |

## 二、国家标准编制原则、主要内容及其确定依据

### （一）标准编制原则和依据

本标准文件按照 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。

（1）在国内当前的技术条件下实现标准化目标具有完全可能性。

（2）本项目的技术与主流技术发展方向相符合。

（3）当前技术条件下标准可实现。

### （二）标准主要技术内容说明

本文件描述了超高反射率光学薄膜的性能表征及测量方法。本文件适用于超高反射率光学薄膜在设计、研发、生产制造及使用过程中的性能测试。

本标准的主要技术内容如下：1 范围、2 规范性引用文件、3 术语和定义、4 超高反射率光学薄膜的概述、5 测量条件、6 测量设备、7 测试方法、8 测试报告。

### （三）标准中主要技术内容确定的依据和过程

本标准在编制过程中，遵循了科学性、实用性、可操作性的原则。技术内容的确定主要基于国内外超高反射率光学薄膜技术发展现状、核心应用场景（如激光干涉引力波探测、光学原子钟超稳激光、痕量原子分析等）的性能需求，以及国内主流研制单位的技术水平。具体确定过程与依据如下：

#### 1. 核心参数体系的构建

反射率、透射率和光学损耗是超高反射率光学薄膜的核心光学参数。在此基础上，光学损耗根据来源分为吸收损耗和散射损耗。针对于量子精密测量等领域的特殊要求，薄膜的布朗热噪声机械损耗关切到激光系统的频率稳定度核心指标，同样作为性能表征及测量的一项核心参数。此外，表面粗糙度可以为散射损耗提供参考，反射和透射光谱可以为反射率和透射率提供参考，均在薄膜制备过程的表征中有重要意义。最后，结合超高反射率光学薄膜在地面和空间的使用场景，需要开展环境适应性测试。

#### 2. 与光学谐振腔相关的反射率、透射率和光学损耗测量

依据来源：参考了国际光学领域的通用表征方法（如 A. E. Siegman 《Lasers》 相关理论）以及国际先进实验室（如 LIGO、NIST、JILA 等）对超高反射率光学薄膜的反射率、透射率和光学损耗测量方法。

确定过程：起草组调研了北京大学、中国科学技术大学、合肥国家实验室等单位在超稳激光和痕量分析领域的成果，总结了基于光学谐振腔的超高反射率光学薄膜性能表征方法。如使用腔衰荡 (Cavity Ring-down, CRD) 得到反射率的方法；使用 PDH 锁频方法将激光器频率锁定到腔共振频率上，后通过腔前后功率测量得到透过率和光学损耗的方法等。

### 3. 布朗热噪声机械损耗测量

依据来源：参考了国际弹性力学领域的通用表征方法（如 L. D. Landau, E. M. Lifshitz 《Theory of Elasticity》相关理论）以及国际先进实验室（如 LIGO, Caltech, SUPA 等）对布朗热噪声机械损耗的测量方法。

确定过程：起草组调研了合肥国家实验室、中国科学技术大学、同济大学等单位在布朗热噪声机械损耗测量领域的成果，总结了基于高品质因子谐振器的镀膜机械损耗实验过程，和根据有限元仿真计算弹性力学参数的计算方法。

### 4. 环境适应性测试

依据来源：参考了 GB/T 26331-2010 《光学薄膜元件环境适应性试验方法》和 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》等现行标准，结合超高反射率光学薄膜的实际地面和空间应用场景，规范了环境适应性测试的项目和参数。

确定过程：起草组调研了中国科学技术大学和合肥国家实验室在超高反射率光学薄膜地面和空间应用的具体场景，确定了包括地面应用所需的高低温循环测试、清洗测试、附

着力测试和极低温测试，以及针对于在轨运行需要满足的伽马射线辐照测试和电子辐照测试。

5. 安全与环境要求的确定依据：参照GB 44703-2024《光辐射安全通用要求》和GB/T 7247.1-2024《激光产品的安全》及相关实验室环境标准。

确定过程：考虑到超高反射率光学薄膜的测试通常需要窄线宽激光器和高功率泵浦激光器等，且对环境振动和温度漂移极其敏感。因此，在第5.1节测试环境条件中，规定了温度（20° C-25° C）和洁净度（ISO 7级）要求，这是基于国内实验室环境控制能力的平均水平以及设备稳定运行的物理需求确定。

### 三、试验验证的分析、综述报告，技术经济论证，预期的经济效益、社会效益和生态效益

本标准中涉及的验证实验数据见标准文档的附件及测试报告所示。

#### （一）主要试验的分析

本标准对超高反射率光学薄膜的性能表征指标提供测量方法，其中性能表征项目包括反射率、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。试验验证围绕上述项目展开，重点考察光腔衰荡法测量反射率、光学谐振腔锁定法测量透射率和光学损耗、光热方法测量吸收损耗、散射测量方法评价散射损耗、振动衰荡测试提取镀膜机械损耗，以及干涉仪和原子力显微镜评价表面形貌误差等内容。

## （二）综述报告

我国已形成完整技术积累。中国科学技术大学 2019 年以来开展超高反射率光学薄膜制备和技术开发，目前已经建立起国际领先的制备和测试表征能力：团队 2023 年实现熔融石英衬底上反射率 99.999325%@1397nm，2026 年实现单晶硅衬底上反射率 99.999607%@1397nm；并搭建起国际先进水平的测试平台，包括光腔衰荡测量、布朗热噪声机械损耗测量、光热弱吸收测量和散射损耗测量等。超高反射率光学薄膜已广泛应用于引力波探测、光学原子钟超稳激光、时频传递、中性原子量子计算等领域，亟需制定统一国家标准。

## （三）技术经济论证

国内目前有超过 10 家单位掌握超高反射率光学薄膜测试能力，指标均基于实验数据，技术可行。现有机构仅需少量校准及规范化成本（单项测试数千元）。对于掌握超高反射率光学薄膜的制备能力的单位，本标准可减少重复测试投入，规范制备与测试流程，具有高的技术经济可行性。

## （四）预期的经济效益、社会效益和生态效益

经济效益：统一测试方法，降低沟通成本，推动产品化与产业化，支撑量子通信、量子计算、量子精密测量等下游发展，预计形成量子产业新增市场。社会效益：完善量子技术标准体系，促进人才培养与成果转化，提升国际话语权。生态效益：促进超高反射率光学薄膜器件优化，提高光学谐振腔性能等。

## 四、与国际、国外同类标准技术内容的对比情况

本标准可填补超高反射率光学薄膜性能表征及测量领域相关国际、国内标准空白，暂无直接对应的国际、国内标准。相关术语和定义编写过程中参考了 GB/T 15313-2008 激光术语（ISO 11145:2006，MOD）等国家标准和国际标准。部分测试技术内容引用了 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》、GB/T 26331-2010《光学薄膜元件环境适应性试验方法》等标准文件。

#### **五、以国际标准为基础的起草情况，以及是否合规引用或者采用国际国外标准，并说明未采用国际标准的原因**

经检索，国际上还没有类似的标准，本标准未翻译或采用国际标准。

#### **六、与有关法律、行政法规及相关标准的关系**

经查，本标准与现有标准及制定中的标准无交叉重复，不涉及国内外专利，与有关的现行法律、法规和强制性国家标准无冲突。

#### **七、重大分歧意见的处理经过和依据**

本标准在立项及各次讨论会以及编写讨论中，没有产生重大分歧。

#### **八、涉及专利的有关说明**

未发现涉及相关专利。

#### **九、实施国家标准的要求，以及组织措施、技术措施、过渡期和实施日期的建议等措施建议**

鉴于本标准规定内容不涉及人身健康和生命财产安全、国家安全、生态环境安全等内容，属于基础性标准。根据标准化法及有关规定，建议本标准作为推荐性国家标准。

制备与评估是实现超高反射率光学薄膜的物理前提和验证技术。鉴于超高反射率光学薄膜是量子精密测量等领域的核心器件，国内外相关商业化已经开始布局，制定相应推荐性国家标准，可进一步规范超高反射率光学薄膜的研发和生产，减少歧义和误解，强化基础通用标准制定，增加前瞻性、引领性国家标准供给，对推动超高反射率光学薄膜技术融合创新和产业发展具有重要意义。

本标准的建议实施日期为：自发布之日起 6 个月。

## **十、其他应当说明的事项**

编写工作组承诺，本标准文件无版权风险。

本标准立项阶段确定的名称原为《量子精密测量用超高反射率光学薄膜性能表征及测量方法》。在标准起草过程中，工作组经论证认为，原名称中“量子精密测量用”的表述侧重于应用场景描述，易使标准使用者对立项既定的适用范畴产生窄化误读，无法完整体现标准在整个量子技术领域内的共性技术属性。本标准的核心技术内容为超高反射率光学薄膜的性能表征及测量方法，其技术对象具有明确的物理内涵和指标界定，标准的技术要求、试验方法和评价指标均围绕该特定技术对象展开，并不因应用场景的不同而发生改变。

为准确体现标准的技术属性，避免名称中的场景限定词对标准适用性产生不必要的误导，工作组决定将标准名称修

改为《量子技术 超高反射率光学薄膜性能表征及测量方法》。其中"量子技术"作为领域定位词，与标准立项时所属的标准体系（量子技术领域标准体系）保持一致，未改变标准的技术对象、技术内容和适用范围。本次名称修改仅对标准名称的表述方式进行调整，标准的技术内容、适用范围和核心技术指标均维持立项阶段确定的范围不变。

本标准聚焦超高反射率光学薄膜产业发展的共性技术需求，以统一性能测试方法、规范市场评价体系为目标，在起草过程中严格遵循“开放、公平、公正”原则，充分吸纳了产学研用各类市场主体的意见，未设置任何排除、限制竞争的条款，未偏袒特定主体或技术路线，标准内容符合国家公平竞争相关法律法规及政策要求，能够为各类市场主体提供平等的技术依据和竞争环境。

编写工作组承诺，本标准编写过程中未参考或引用任何受版权保护的文本、图表、数据或其他专有内容，本标准无版权风险，在标准后续征求意见、审定及实施过程中，将持续保障公平竞争原则的落实，确保标准的中立性和公正性。

《量子技术 超高反射率光学薄膜性能表征及测量方法》

国家标准编写工作组

2026 年 6 月 30 日

附件 1

《量子技术 超高反射率光学薄膜性能表征及测量方法》

实验测试报告 1

1、待测样品组

测试组选择了一批超高反射率光学薄膜镀膜样品，工作波长 1397nm，用于性能测试任务，样品信息如表 A.1 所示，照片如图 A.1 所示。

表 A.1 被测超高反射率光学薄膜的样品信息

| 样品编号 | 样品信息           | 样品用途                                                          |
|------|----------------|---------------------------------------------------------------|
| A1   | 高反镜，平面         | 标准样品，反射率标定                                                    |
| A2   | 高反镜，平凹，曲率半径 1m | 标准样品，反射率、透射率和光学损耗标定                                           |
| A3   | 高反镜，平凹，曲率半径 1m | 标准样品，反射率、透射率和光学损耗标定                                           |
| A4   | 待测高反镜，平面       | 反射率测量、透射率和光学损耗测量、吸收损耗测量、散射损耗测量、反射光谱测量、透射光谱测量、表面形貌误差测量、环境适应性测量 |
| A5   | 镀膜减薄硅悬臂        | 布朗热噪声机械损耗测量                                                   |

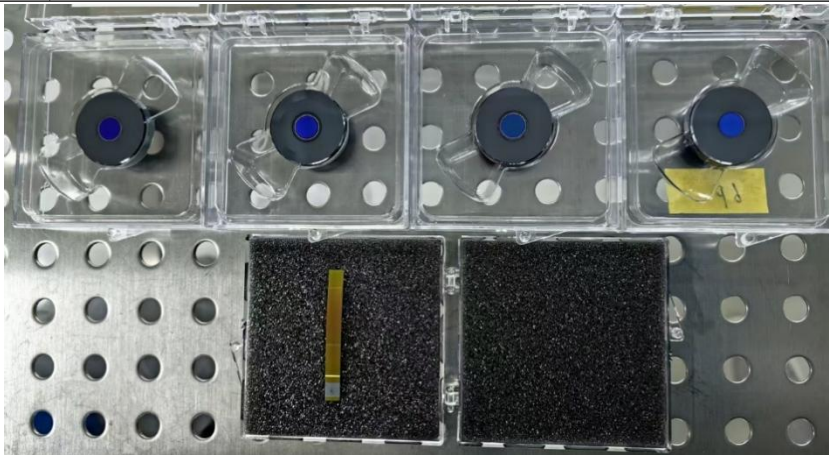


图 A.1 被测超高反射率光学薄膜的实物照片

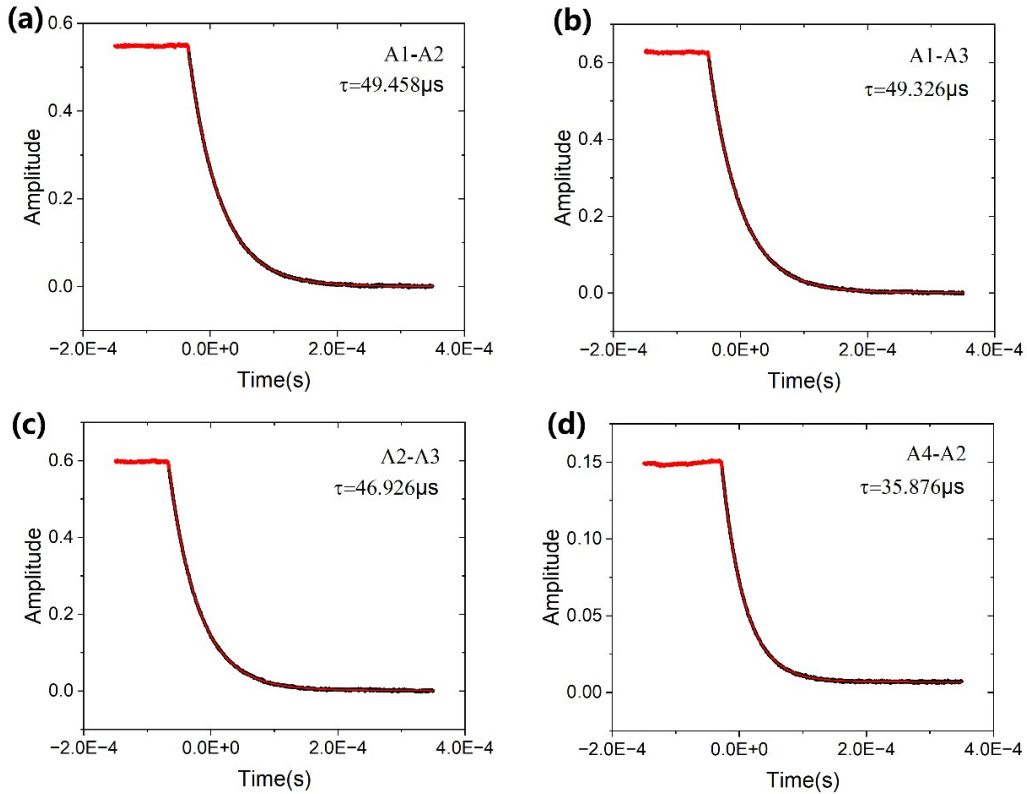
2、性能表征及测量结果

## 2.1 反射率测试（标片反射率标定）

根据标准文档 7.1.1 节的测试方法，首先需要根据附录 C.1 所述测试方法进行标准反射镜的反射率标定。我们选择 A1, A2, A3 三个样品作为标准样品。测量过程中，我们分别选择 A1-A2, A1-A3, A2-A3 三种光学谐振腔组合，在腔长 10cm 的室温条件下,根据标准文档 7.1.1 光关断式光腔衰荡法进行测量，得到衰荡曲线分别如图 A.2(a)(b)(c)所示。计算得到的结果如表 A.2 所示。

表 A.2 反射率测量结果

| 组合    | 实验测得                       | 计算所得                           | 结果                     |
|-------|----------------------------|--------------------------------|------------------------|
| A1-A2 | $\tau = 49.458\mu\text{s}$ | $R_{A1} * R_{A2} = 0.99998652$ | $R_{A1} = 99.999361\%$ |
| A1-A3 | $\tau = 49.326\mu\text{s}$ | $R_{A1} * R_{A3} = 0.99998648$ | $R_{A2} = 99.999291\%$ |
| A2-A3 | $\tau = 46.926\mu\text{s}$ | $R_{A2} * R_{A3} = 0.99998578$ | $R_{A3} = 99.999287\%$ |
| A4-A2 | $\tau = 35.876\mu\text{s}$ | $R_{A4} * R_{A2} = 0.99998140$ | $R_{A4} = 99.998850\%$ |



## 图 A.2 反射率测量结果

然后选择 A2 作为标准反射镜, 和 A4 待测样品组成光学谐振腔, 根据标准文档 7.1.1 节光关断式光腔衰荡法测量其反射率。得到衰荡曲线如图 A.2(d)所示, 反射率结果为 99.998850%。

## 2.2 透射率和光学损耗测试 (标片透射率和光学损耗标定)

根据标准文档 7.2 节的测试方法, 首先需要根据附录 C.2 所述测试方法进行标准反射镜的透射率和光学损耗标定。我们选 A2 和 A3 作为标准样品, 组成 10cm 长的光学谐振腔, 根据标准文档 7.2 节, 分别从 A2 侧入射和 A3 侧入射测量得到两组实验数据。

实验过程中, 存在三点修正: 1.使用到的真空腔, 前后窗口片在 1397nm 的透射率均为 0.94; 2.由于样品均带 0.5 度的楔角, 除腔耦合光反射光斑外, 还存在镀膜背面的两次反射光斑, 这部分反射光斑的功率与耦合光反射功率的比值是 0.055, 其贡献计入  $I_c$  的修正; 3.在真空腔入射窗口片外放置分束器进行  $I_c$  的测量, 分束器对反射光的分光比例为 0.228。由此对在真空腔外部测量得到的  $I_{a0}, I_{b0}, I_{c0}$  数值进行了修正 ( $I_a = I_{a0} * 0.94$ ,  $I_b = \frac{I_{b0}}{0.94}$ ,  $I_c = I_{c0} * \frac{1.055}{0.94*0.228}$ ) 以获得真实的  $I_a, I_b, I_c$ 。

在前期反射率测量的基础上,得到的结果如表 A.3 所示,根据表中数据进一步解方程,  $T_{A2} = 4.84ppm$ ,  $T_{A3} = 3.63ppm$ 。

表 A.3 透射率和光学损耗测量结果

| 组合    | 实验测得               | 计算所得             | 数据结果                                                                                 |
|-------|--------------------|------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| A2-A3 | $I_a = 194.6\mu W$ | $\eta = 86.36\%$ | $T_{A2} = 4.84ppm$<br>$L_{A2} = 3.50ppm$<br>$T_{A3} = 3.63ppm$<br>$L_{A3} = 2.25ppm$ |
|       | $I_b = 56.1\mu W$  |                  |                                                                                      |
|       | $I_c = 49.7\mu W$  |                  |                                                                                      |
|       | $\beta = 0.96$     |                  |                                                                                      |
| A3-A2 | $I_a = 192.7\mu W$ | $\eta = 88.77\%$ |                                                                                      |
|       | $I_b = 57.1\mu W$  |                  |                                                                                      |
|       | $I_c = 67.8\mu W$  |                  |                                                                                      |
|       | $\beta = 0.96$     |                  |                                                                                      |
| A4-A2 | $I_a = 213.4\mu W$ | $\eta = 86.97\%$ | $T_{A4} = 1.57ppm$<br>$L_{A4} = 9.93ppm$                                             |
|       | $I_b = 15.7\mu W$  |                  |                                                                                      |
|       | $I_c = 158.2\mu W$ |                  |                                                                                      |
|       | $\beta = 0.96$     |                  |                                                                                      |

然后选择 A2 作为标准反射镜,和 A4 待测样品组成光学谐振腔,根据 7.2 测量其透射率和光学损耗。在前述反射率测量的基础上,得到透射率结果为  $T_{A4} = 1.57ppm$ ,根据  $R + T + L = 1$  计算得到对应的光学损耗为  $L_{A4} = 9.93ppm$ 。

## 2.3 吸收损耗

根据标准文档 7.3.1 节所述,使用光热透镜方法测量样品 A4 的吸收损耗,得到的二维吸收分布图像如图 A.3 所示。统计吸收损耗为  $2.481 \pm 0.220ppm$ 。

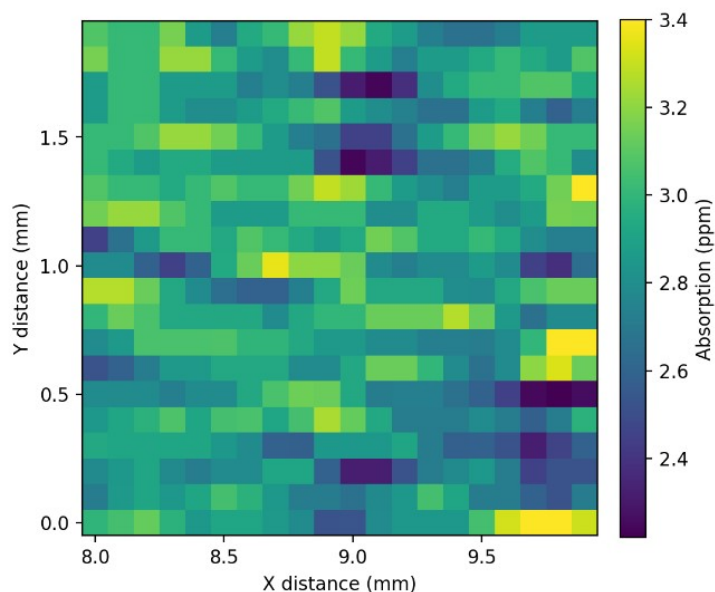


图 A.3 吸收损耗测量结果

## 2.4 散射损耗

根据标准文档 7.4.2 节所述，使用角分辨测量法测量样品 A4 的散射损耗，所用设备为速派光学的 MWS 多波长散射特性测量仪(Super Optics-MWS)。测试中的入射角 $\theta_i=10.0^\circ$ ，BRDF 测试曲线如图 A.4 所示。积分范围根据标准文档 7.4.2 节所述为  $3^\circ$ - $85^\circ$ ，数据分析得到总散射损耗为 8.1ppm。

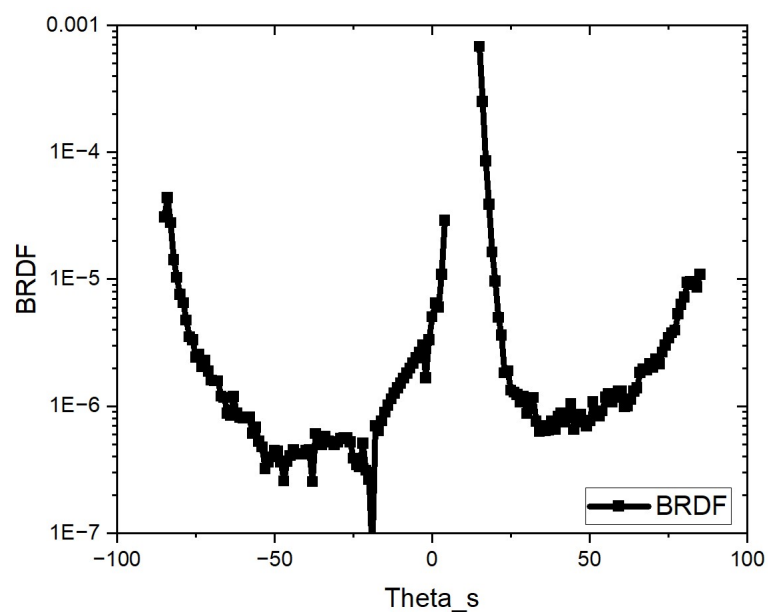


图 A.4 散射损耗测量结果

## 2.5 布朗热噪声机械损耗

根据标准文档 7.5 节所述测试方法，使用样品 A5 在 4K 低温下进行样品的布朗热噪声机械损耗测量。得到数据如表 A.4 和图 A.5 所示。

表 A.4 布朗热噪声机械损耗测量结果

| 频率       | 镀膜前机械损耗 | 镀膜后机械损耗 | 耗散稀释因子 | 镀膜机械损耗  |
|----------|---------|---------|--------|---------|
| 83.0Hz   | 4.27e-7 | 1.59e-5 | 20.54  | 3.18e-4 |
| 531.4Hz  | 8.23e-7 | 1.87e-5 | 20.78  | 3.71e-4 |
| 1499.7Hz | 8.76e-7 | 1.79e-5 | 20.96  | 3.57e-4 |
| 2951.0Hz | 1.00e-6 | 1.58e-5 | 21.23  | 3.14e-4 |

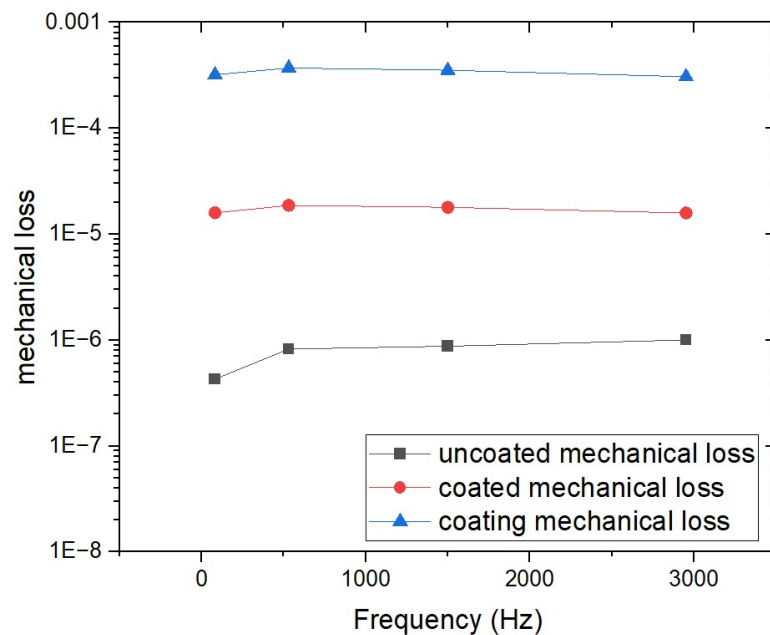


图 A.5 布朗热噪声机械损耗测量结果

## 2.6 反射光谱

根据标准文档 7.6.1 节所述测试方法，使用分光光度计 (Agilent-Cary5000) 测量样品 A4 的反射光谱，得到图 A.6。

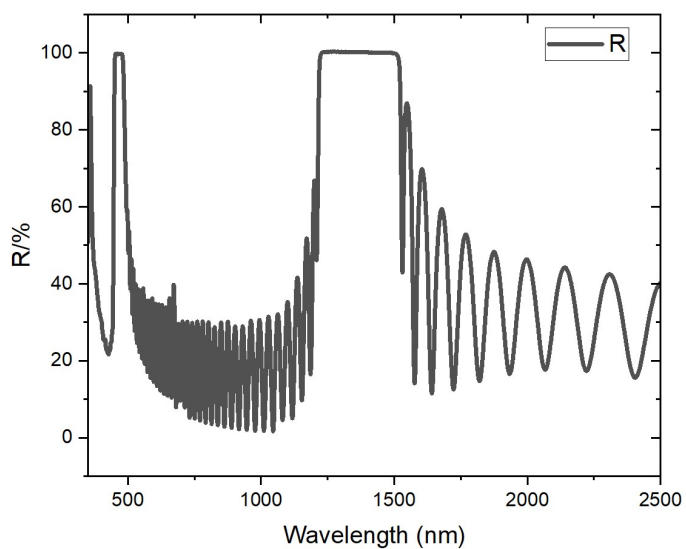


图 A.6 使用分光光度计测量反射光谱结果

根据标准文档 7.6.2 节所述测试方法，使用傅里叶变换红外光谱仪(Bruker-Vertex 80v)测量样品 A4 的反射光谱，得到图 A.7。

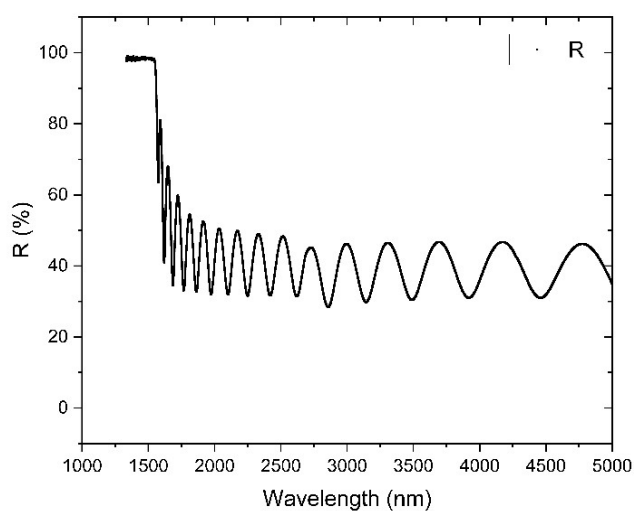


图 A.7 使用傅里叶变换红外光谱仪测量反射光谱结果

## 2.7 透射光谱

根据标准文档 7.7.1 节所述测试方法，使用分光光度计 (Agilent-Cary5000)测量样品 A4 的透射光谱，得到图 A.8。

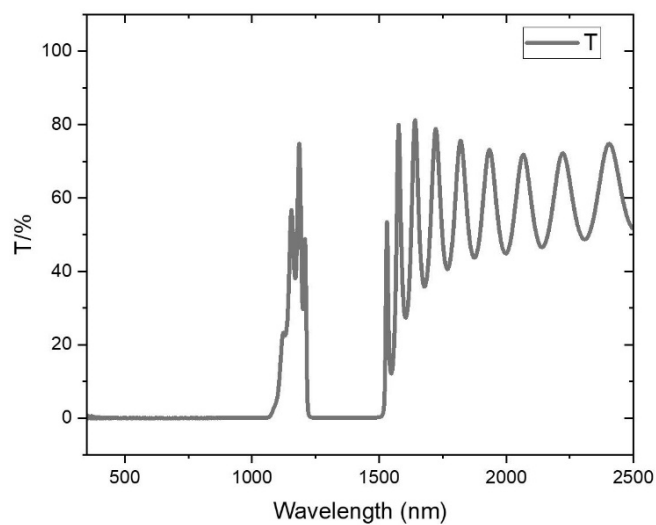


图 A.8 使用分光光度计测量透射光谱结果

根据标准文档 7.7.2 节所述测试方法，使用傅里叶变换红外光谱仪(Bruker-Vertex 80v)测量样品 A4 的透射光谱，得到图 A.9。

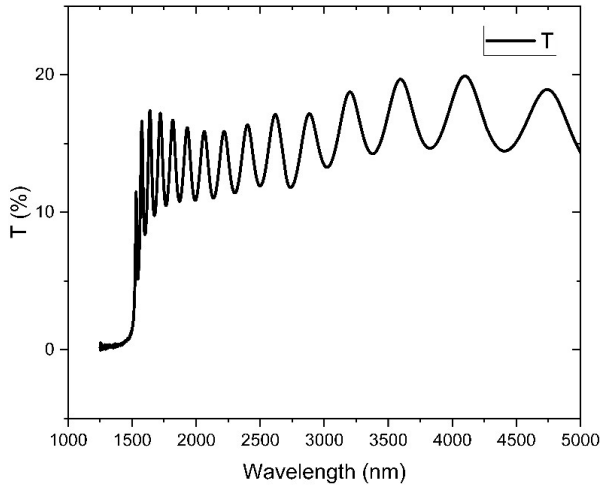


图 A.9 使用傅里叶变换红外光谱仪测量透射光谱结果

2.8 表面形貌误差

2.8.1 低空间频率表面形貌误差

根据标准文档 7.8.1 节所述测试方法，使用激光干涉仪(乾耀光学-G100HD)对样品的低空间频率表面粗糙度进行测试。如图 A.10 所示，结果为  $PV=0.029\lambda$ ,  $RMS=0.003\lambda$ 。

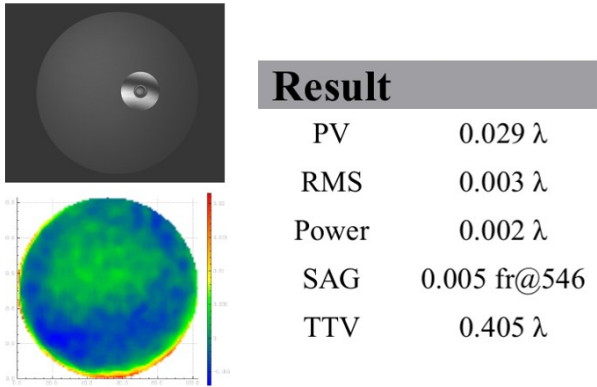


图 A.10 低空间频率表面形貌误差的激光干涉仪测量结果。

### 2.8.2 中空间频率表面形貌误差

根据标准文档 7.8.2 节所述测试方法，使用白光干涉仪 (Sensofar-Sneox 090)对样品的中空间频率表面粗糙度进行测试。如图 A.11 所示，结果为  $R_a=0.09\text{nm}$ ,  $RMS=0.12\text{nm}$ 。

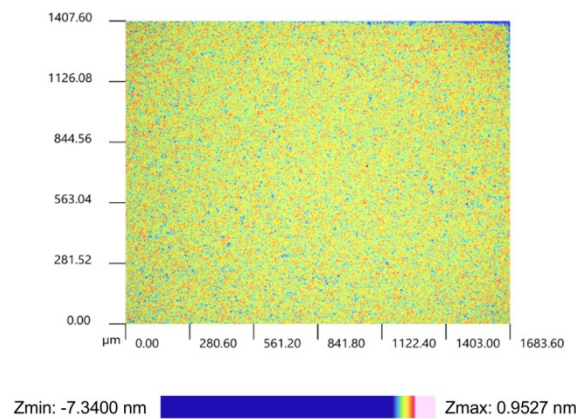


图 A.11 中空间频率表面形貌误差的白光干涉仪测量结果。

### 2.8.3 高空间频率表面形貌误差

根据标准文档 7.8.3 节所述测试方法，使用原子力显微镜 (Oxford-Jupiter XR)对样品的高空间频率表面粗糙度进行测试。如图 A.12 所示，结果为  $R_a=0.16\text{nm}$ ,  $RMS=0.20\text{nm}$ 。

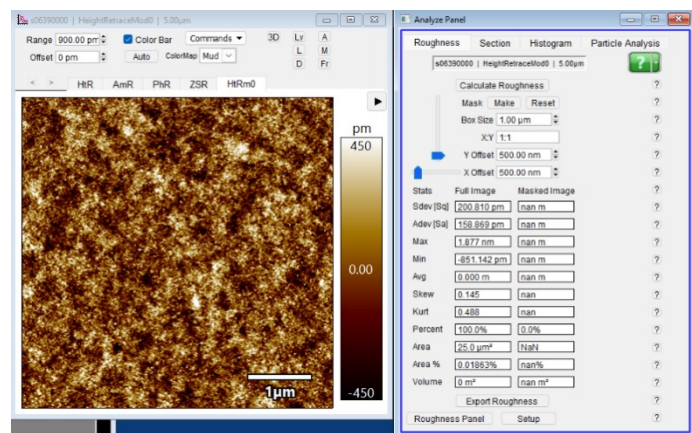


图 A.12 高空间频率表面形貌误差原子力显微镜测量结果。

## 2.9 环境适应性测试

根据标准文档 7.9 节所述测试方法，选择 A4 作为待测样品进行环境适应性测试。根据 7.9.1 节、7.9.2 节、7.9.3 节、7.9.4 节、7.9.5 节、7.9.6 节分别进行高低温测试、清洗测试、附着力测试、极低温测试、伽马射线辐照测试、电子辐照测试，结果如表 A.5 所示。

表 A.5 环境适应性测试结果

| 测试                                      | 反射率       | 光学损耗    |
|-----------------------------------------|-----------|---------|
| 无                                       | 99.9987%  | 10.2ppm |
| 高低温                                     | 99.9987%  | 10.2ppm |
| 高低温-极低温                                 | 99.9989%  | 8.2ppm  |
| 高低温-极低温- $\gamma$ 射线                    | 99.9987%  | 10.2ppm |
| 高低温-极低温- $\gamma$ 射线-附着力                | 99.99895% | 7.7ppm  |
| 高低温-极低温- $\gamma$ 射线-附着力-清洗             | 99.99905% | 6.7ppm  |
| 高低温-极低温- $\gamma$ 射线-附着力-清洗-电子辐照        | 99.99895% | 7.7ppm  |
| 高低温-极低温- $\gamma$ 射线-附着力-清洗-电子辐照-附着力-清洗 | 99.99909% | 6.3ppm  |

附件 2

《量子技术 超高反射率光学薄膜性能表征及测量方法》

实验测试报告 2

1、待测样品组

测试组选择了一批超高反射率光学薄膜镀膜样品，工作波长 1550nm，用于性能测试任务，样品信息如表 B.1 所示，照片如图 B.1 所示。

表 B.1 被测超高反射率光学薄膜的样品信息

| 样品编号 | 样品信息           | 样品用途                                                  |
|------|----------------|-------------------------------------------------------|
| B1   | 高反镜，平面         | 标准样品，反射率标定                                            |
| B2   | 高反镜，平凹，曲率半径 1m | 标准样品，反射率、透射率和光学损耗标定                                   |
| B3   | 高反镜，平凹，曲率半径 1m | 标准样品，反射率、透射率和光学损耗标定                                   |
| B4   | 待测高反镜，平面       | 反射率测量、透射率和光学损耗测量、吸收损耗测量、散射损耗测量、反射光谱测量、透射光谱测量、表面形貌误差测量 |
| B5   | 镀膜熔融石英片        | 布朗热噪声机械损耗测量                                           |

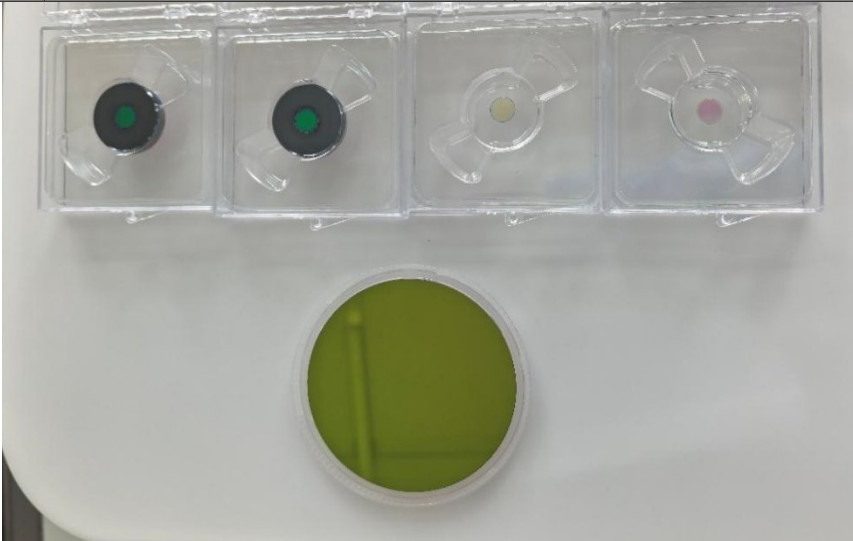


图 B.1 被测超高反射率光学薄膜的实物照片

## 2、性能表征及测量结果

### 2.1 反射率测试（标片反射率标定）

根据标准文档 7.1.1 节的测试方法，首先需要根据附录 C.1 所述测试方法进行标准反射镜的反射率标定。我们选择 B1, B2, B3 三个样品作为标准样品。测量过程中，我们分别选择 B1-B2, B1-B3, B2-B3 三种光学谐振腔组合，在腔长 10cm 的室温条件下，根据标准文档 7.1.1 光关断式光腔衰荡法进行测量，得到衰荡曲线分别如图 B.2(a)(b)(c)所示。计算得到的结果如表 B.2 所示。

表 B.2 反射率测量结果

| 组合    | 实验测得                 | 计算所得                          | 结果                     |
|-------|----------------------|-------------------------------|------------------------|
| B1-B2 | $\tau = 50.874\mu s$ | $R_{B1} * R_{B2} = 0.9999869$ | $R_{B1} = 99.999317\%$ |
| B1-B3 | $\tau = 49.413\mu s$ | $R_{B1} * R_{B3} = 0.9999865$ | $R_{B2} = 99.999371\%$ |
| B2-B3 | $\tau = 51.484\mu s$ | $R_{B2} * R_{B3} = 0.9999870$ | $R_{B3} = 99.999333\%$ |
| B4-B3 | $\tau = 26.621\mu s$ | $R_{B4} * R_{B3} = 0.9999750$ | $R_{B4} = 99.998163\%$ |

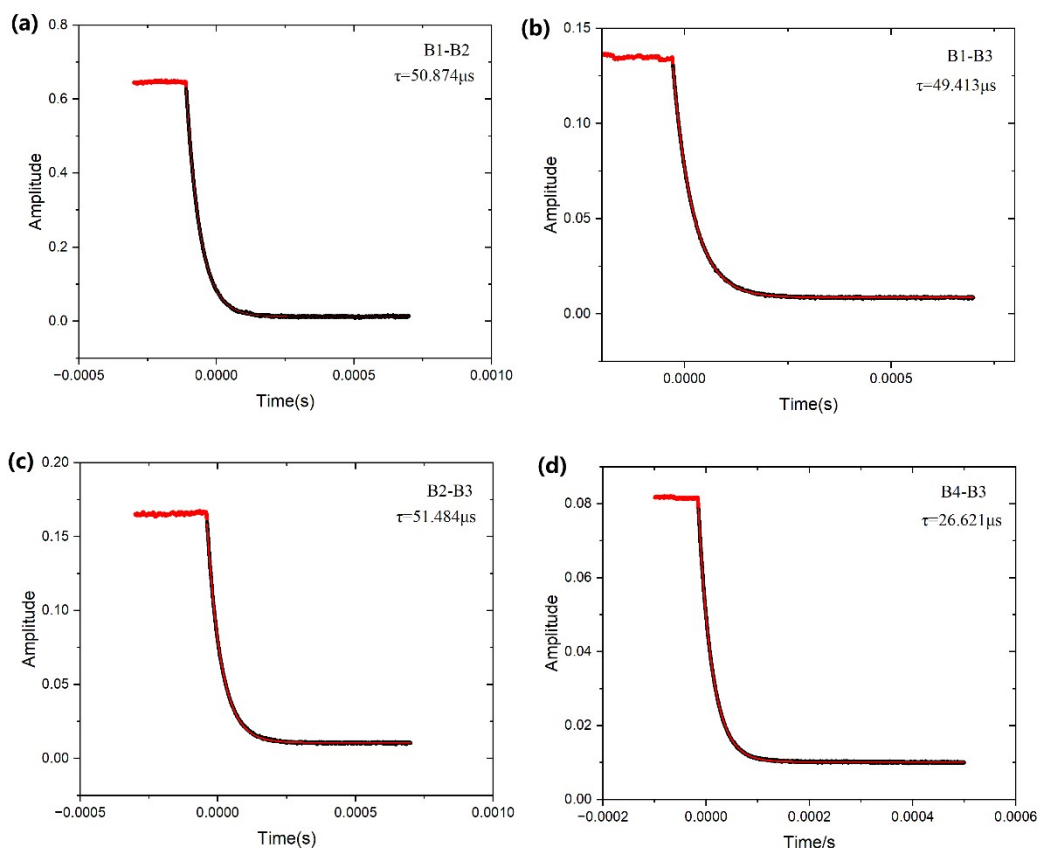


图 B.2 反射率测量结果

然后选择 B3 作为标准反射镜, 和 B4 待测样品组成光学谐振腔, 根据标准文档 7.1.1 节光关断式光腔衰荡法测量其反射率。得到衰荡曲线如图 B.2(d)所示, 反射率结果为 99.998163%。

## 2.2 透射率和光学损耗测试（标片透射率和光学损耗标定）

根据标准文档 7.2 节的测试方法, 首先需要根据附录 C.2 所述测试方法进行标准反射镜的透射率和光学损耗标定。我们选 B2 和 B3 作为标准样品, 组成 10cm 长的光学谐振腔,

根据标准文档 7.2 节，分别从 B2 侧入射和 B3 侧入射测量得到两组实验数据。

实验过程中，存在一点修正：在入射端放置分束器进行  $I_c$  的测量，分束器对反射光的分光比例为 0.260。由此对测量得到的  $I_{c0}$  数值进行了修正 ( $I_c = \frac{I_{c0}}{0.260}$ ) 以获得真实的  $I_c$ 。

在前期反射率测量的基础上，得到的结果如表 B.3 所示，根据表中数据进一步解方程， $T_{B2} = 4.52ppm, T_{B3} = 2.08ppm$ 。

表 B.3 透射率和光学损耗测量结果

| 组合    | 实验测得                | 计算所得             | 数据结果                                                                                 |
|-------|---------------------|------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| B2-B3 | $I_a = 170\mu W$    | $\eta = 58.73\%$ | $T_{B2} = 4.52ppm$<br>$L_{B2} = 1.77ppm$<br>$T_{B3} = 2.08ppm$<br>$L_{B3} = 4.60ppm$ |
|       | $I_b = 21\mu W$     |                  |                                                                                      |
|       | $I_c = 84.7\mu W$   |                  |                                                                                      |
|       | $\beta = 0.94$      |                  |                                                                                      |
| B3-B2 | $I_a = 206\mu W$    | $\eta = 83.08\%$ |                                                                                      |
|       | $I_b = 36\mu W$     |                  |                                                                                      |
|       | $I_c = 119.4\mu W$  |                  |                                                                                      |
|       | $\beta = 0.94$      |                  |                                                                                      |
| B4-B3 | $I_a = 201.8\mu W$  | $\eta = 80.16\%$ | $T_{B4} = 3.21ppm$<br>$L_{B4} = 15.16ppm$                                            |
|       | $I_b = 6.48\mu W$   |                  |                                                                                      |
|       | $I_c = 133.82\mu W$ |                  |                                                                                      |
|       | $\beta = 0.94$      |                  |                                                                                      |

然后选择 B3 作为标准反射镜，和 B4 待测样品组成光学谐振腔，根据 7.2 测量其透射率和光学损耗。在前述反射率测量的基础上，得到透射率结果为  $T_{B4} = 3.21ppm$ ，根据  $R + T + L = 1$  计算得到对应的光学损耗为  $L_{B4} = 15.16ppm$ 。

### 2.3 吸收损耗

根据标准文档 7.3.1 节所述，使用光热透镜方法测量样品 B4 的吸收损耗，得到的二维吸收分布图像如图 B.3 所示。统计吸收损耗为  $2.773 \pm 0.276\text{ppm}$ 。

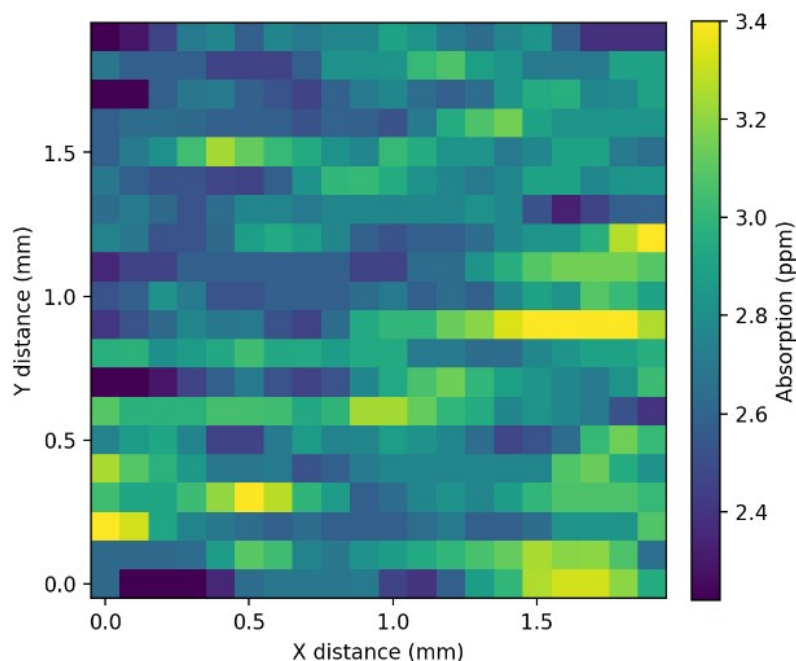


图 B.3 吸收损耗测量结果

## 2.4 散射损耗

根据标准文档 7.4.2 节所述，使用角分辨测量法测量样品 B4 的散射损耗，所用设备为速派光学自研的 MWS 多波长散射特性测量仪(Super Optics-MWS)。

首先使用栅格扫描，得到样品表面的缺陷和颗粒污染分布信息，如图 B.4 所示。根据栅格扫描的结果选取样品中心的洁净区域，进行双向散射分布函数 BRDF 测量。测试中的入射角 $\theta_i=10.0^\circ$ ，BRDF 测试曲线如图 B.5 所示。积分范围根

据标准文档 7.4.2 节所述为  $3^{\circ}$ - $85^{\circ}$ ，数据分析得到总散射损耗为 13.08ppm。

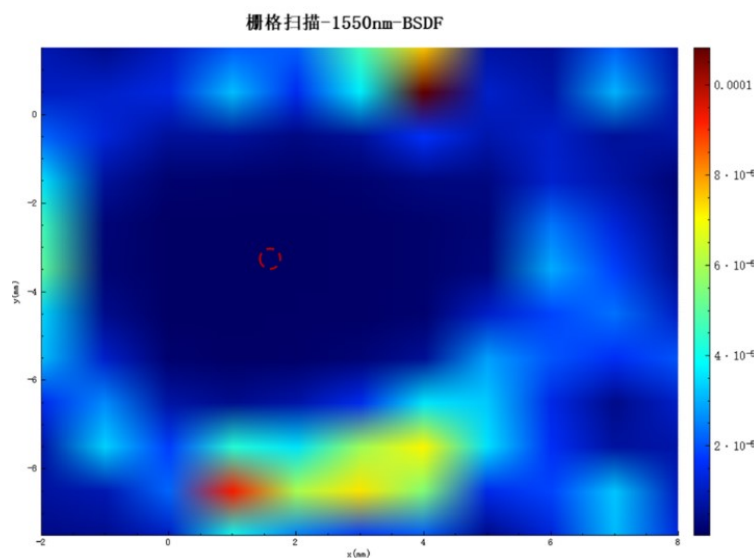


图 B.4 栅格扫描结果，样品中心区域洁净，无颗粒污染

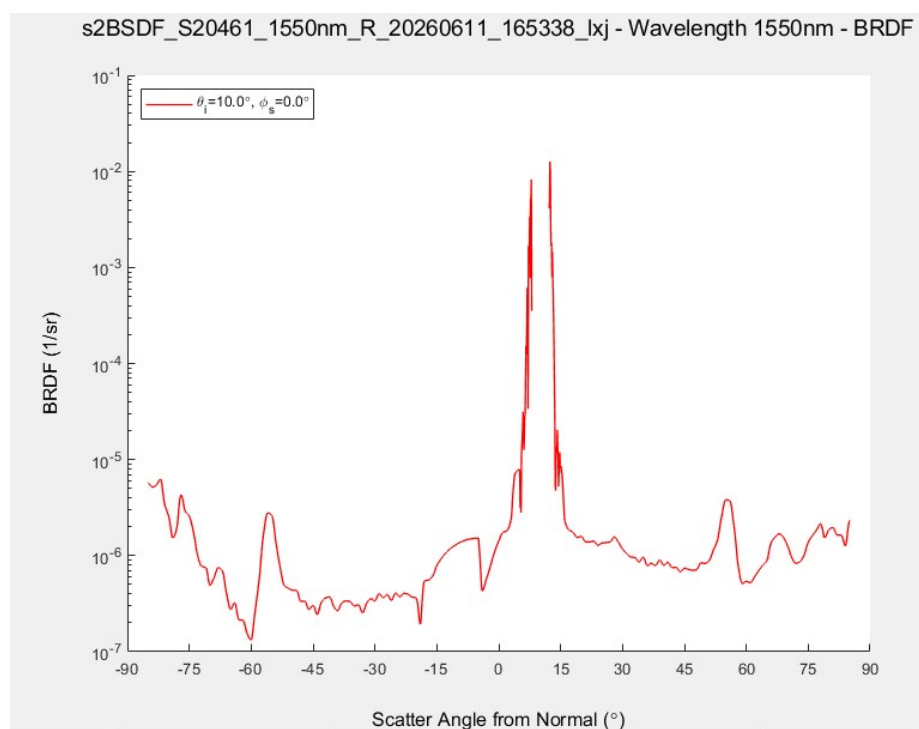


图 B.5 散射损耗 BRDF 测量结果

## 2.5 布朗热噪声机械损耗

根据标准文档 7.5 节所述测试方法，使用样品 B5 在室温下进行样品的布朗热噪声机械损耗测量。得到数据如表 B.4 和图 B.6 所示。

表 B.4 布朗热噪声机械损耗测量结果

| 频率        | 镀膜前机械损耗 | 镀膜后机械损耗 | 耗散稀释因子 | 镀膜机械损耗  |
|-----------|---------|---------|--------|---------|
| 555.74Hz  | 8.73e-8 | 8.16e-6 | 28.27  | 2.29e-4 |
| 1275.65Hz | 8.90e-8 | 7.56e-6 | 28.29  | 2.11e-4 |
| 2221.50Hz | 1.23e-7 | 6.48e-6 | 28.33  | 1.80e-4 |
| 3387.16Hz | 1.43e-7 | 3.91e-6 | 28.36  | 1.07e-4 |
| 4767.90Hz | 1.49e-7 | 5.45e-6 | 28.39  | 1.50e-4 |
| 6359.80Hz | 1.74e-7 | 7.49e-6 | 28.41  | 2.07e-4 |
| 8159.72Hz | 1.87e-7 | 6.93e-6 | 28.45  | 1.91e-4 |

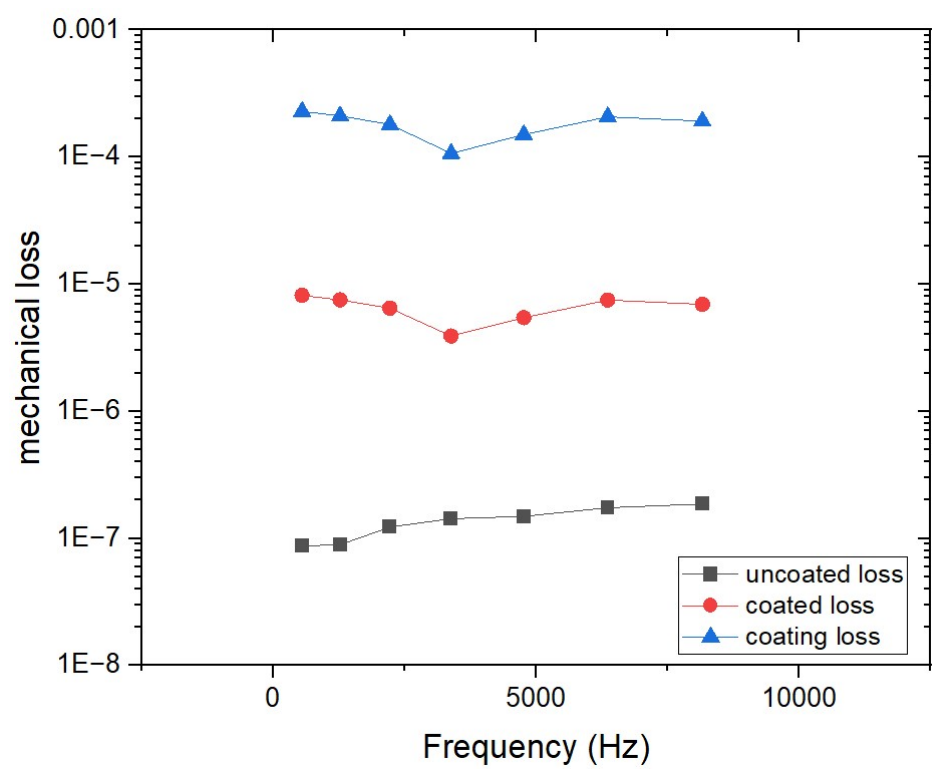


图 B.6 布朗热噪声机械损耗测量结果

## 2.6 反射光谱

根据标准文档 7.6.1 节所述测试方法，使用分光光度计 (Agilent-Cary5000) 测量样品 B4 的反射光谱，得到图 B.7。

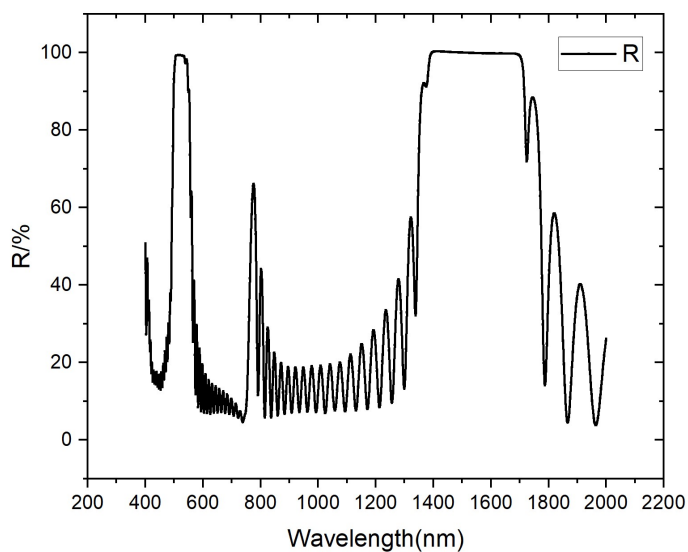


图 B.7 使用分光光度计测量反射光谱结果

## 2.7 透射光谱

根据标准文档 7.7.1 节所述测试方法，使用分光光度计 (Agilent-Cary5000) 测量样品 B4 的透射光谱，得到图 B.8。

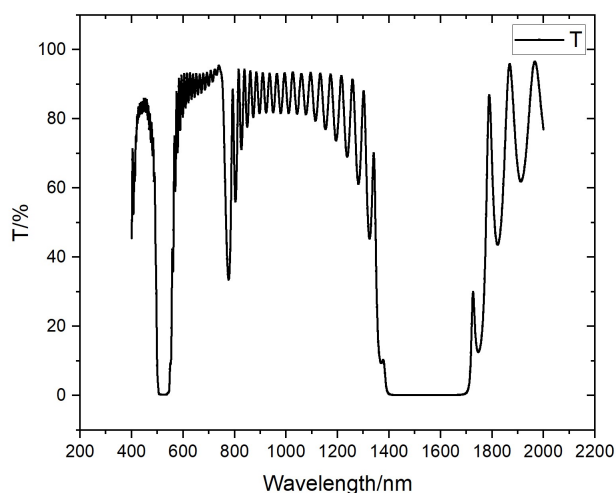


图 B.8 使用分光光度计测量透射光谱结果

## 2.8 表面形貌误差

2.8.1 低空间频率表面形貌误差

根据标准文档 7.8.1 节所述测试方法，使用激光干涉仪 (乾耀光学-G100HD)对样品的低空间频率表面粗糙度进行测试。如图 B.9 所示，结果为  $PV=0.072\lambda$ ， $RMS=0.016\lambda$ 。

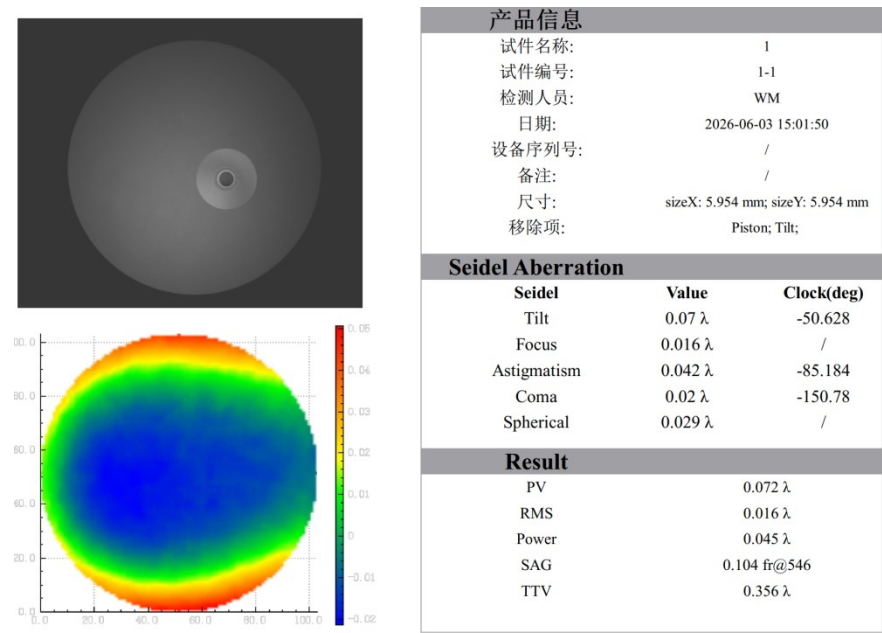


图 B.9 低空间频率表面形貌误差的激光干涉仪测量结果。

2.8.2 中空间频率表面形貌误差

根据标准文档 7.8.2 节所述测试方法，使用白光干涉仪 (Sensofar-Sneox 090)对样品的中空间频率表面粗糙度进行测试。如图 B.10 所示，结果为  $Ra=0.40nm$ ， $RMS=0.50nm$ 。

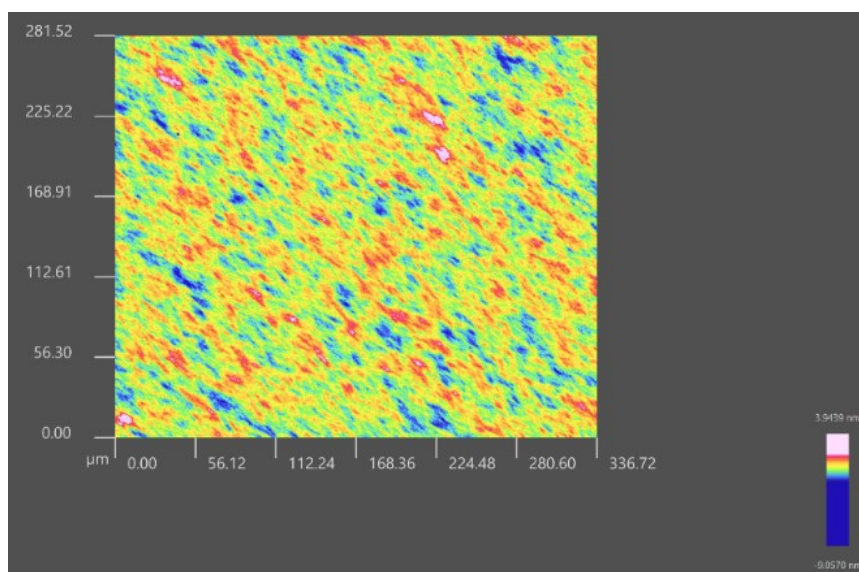


图 B.10 中空间频率表面形貌误差的白光干涉仪测量结果。

### 2.8.3 高空间频率表面形貌误差

根据标准文档 7.8.3 节所述测试方法，使用原子力显微镜(Oxford-Jupiter XR)对样品的高空间频率表面粗糙度进行测试。如图 B.11 所示，结果为  $R_a=0.36\text{nm}$ ， $RMS=0.45\text{nm}$ 。

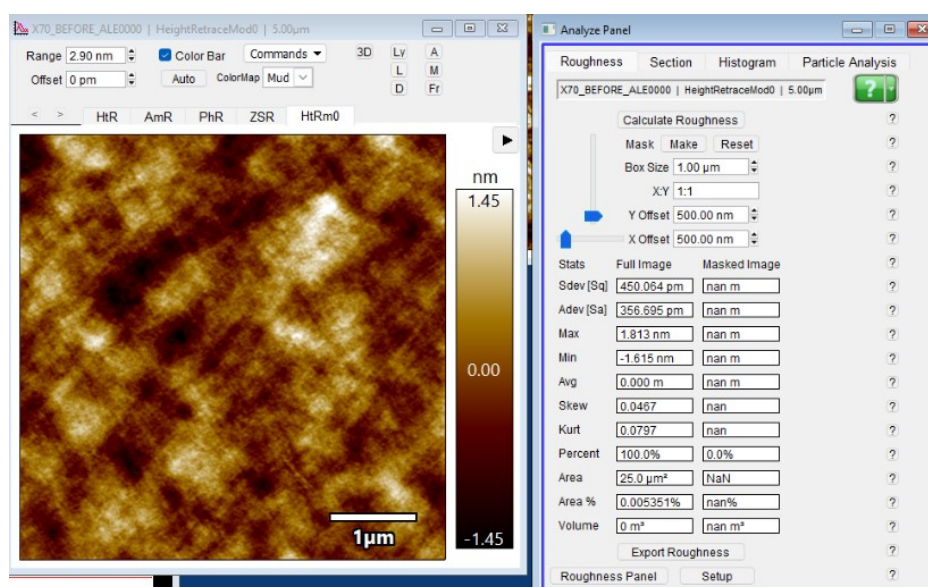


图 B.11 高空间频率表面形貌误差原子力显微镜测量结果。

附件 3

《量子技术 超高反射率光学薄膜性能表征及测量方法》

实验测试报告 3

1、待测样品组

测试组选择了一批超高反射率光学薄膜镀膜样品，用于性能测试任务，样品信息如表 C.1 所示。

表 C.1 被测超高反射率光学薄膜的样品信息

| 样品编号    | 样品信息                    | 样品用途  |
|---------|-------------------------|-------|
| PKU-01  | 熔融石英基底晶体高反镜，工作波长 1397nm | 反射率测量 |
| PKU-02  | 熔融石英基底晶体高反镜，工作波长 1397nm | 反射率测量 |
| HFNL-01 | 单晶硅基底介质高反镜，工作波长 1397nm  | 反射率测量 |
| HFNL-02 | 单晶硅基底介质高反镜，工作波长 1397nm  | 反射率测量 |

2、性能表征及测量结果

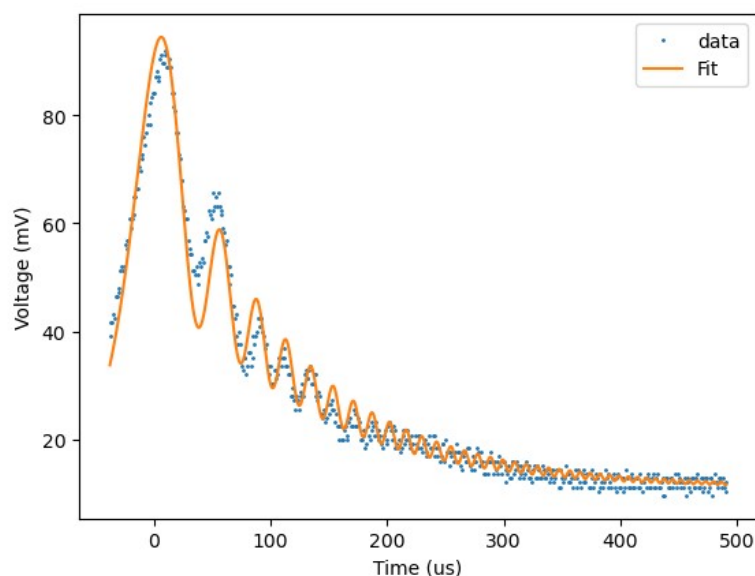
2.1 概述

测试组主要进行光关断式光腔衰荡测量和快速扫频法光腔衰荡测量的对比验证，证明两种方法的可行性和准确性。测试根据标准草案 7.1.1 节和 7.1.2 节方法开展。

实验中选择两组光学谐振腔进行测试，测试腔 1 为北京大学的 30cm 长 ULE 腔，光腔有一对熔融石英衬底晶体高反镜，测试腔 2 为合肥国家实验室提供的 10cm 长单晶硅腔，光腔有一对单晶硅衬底介质高反镜。

2.2 测试腔 1 结果

实验所用为 30 cm 长超低热膨胀系数玻璃（简称 ULE）腔的一对晶体（材料：GaAs/AlGaAs）超高反射率薄膜样品，中心波长为 1397 nm，此前通过共振-切断法测量出该对薄膜的精细度为 33.3(8)万，对应薄膜平均反射率 99.99906(2)%。所用激光器为 TOPTICA 公司的 DL Pro，通过对激光器 PZT 施加三角波电压来实现激光的线性扫频。扫频过程中，在光学腔透射端放置光电探测器（Thorlabs, PDA20CS2）来测量透射端的衰荡信号，然后对透射信号进行拟合，得到衰荡时间，进而得到精细度与反射率。



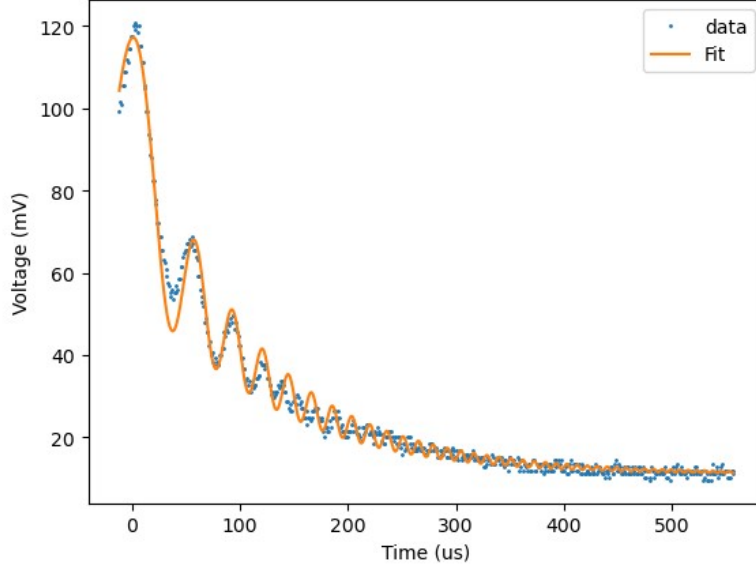


图 C.1 两组激光线性扫频所得光学腔透射端衰荡信号，探测器档位为 40dB，对应带宽 90 kHz。上图拟合出腔存储时间 $\tau = 110(2) \mu s$ ，对应精细度 34.7(7)万，薄膜平均反射率 99.99909(2)%；下图拟合出腔存储时间 $\tau = 107(1) \mu s$ ，对应精细度 33.6(4)万，薄膜平均反射率 99.99907(1)%。两组测量结果均与此前通过共振-切断法得到的测量结果在误差范围内一致。

### 2.3 测试腔 2 结果

测试组分别使用光关断式和快速扫频光腔衰荡法测量，实验所用为 10 cm 长单晶硅腔的一对介质（材料： $Ta_2O_5/SiO_2$ ）超高反射率薄膜样品，中心波长为 1397 nm。所用激光器为频准公司的 FECL-SF-1397-S，在光学腔透射端放置光电探测器（LBTEK，PDAIN10-13M）来测量透射端的衰荡信号。

光关断式测量时，使用的光开关为中电科 26 所的光纤声光调制器(SGTF80-1397-1PFH)，上升时间<25ns。快速

扫频测量时，通过对激光器直流调制端口施加三角波电压来实现激光的线性扫频。

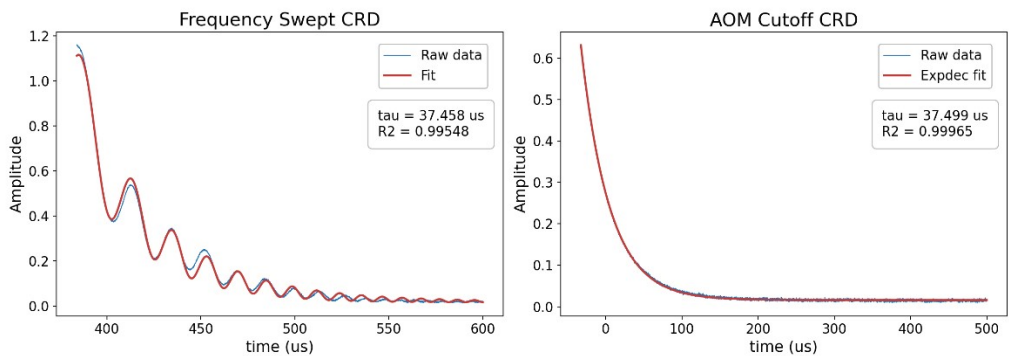


图 C.2 两种测试方法所得光学腔透射端衰荡信号

表 C.2 测试腔 2 的两种光腔衰荡测量方法对比

| 方法   | 衰荡时间/ $\mu\text{s}$ | 腔精细度              | 平均反射率/%                    |
|------|---------------------|-------------------|----------------------------|
| 光关断式 | $37.458 \pm 0.123$  | $352791 \pm 1163$ | $99.9991095 \pm 0.0000029$ |
| 快速扫频 | $37.499 \pm 0.018$  | $353179 \pm 165$  | $99.9991105 \pm 0.0000004$ |

从图 C.2 和表 C.2 可以看出，两种方法测量均能以较高优度拟合，且两种方法可以对比验证。

### 参考文献：

[1] M. Lawrence, et al. Dynamic response of a Fabry–Perot interferometer. Journal of the Optical Society of America B, 1999, 16(4): 523-532.

[2] M. Martin. Quantum metrology and many-body physics: pushing the frontier of the optical lattice clock. University of Colorado at Boulder, 2013.

附件 4

《量子技术 超高反射率光学薄膜性能表征及测量方法》

实验测试报告 4

1、待测样品组

测试组选择了一批超高反射率光学薄膜镀膜样品，用于性能测试任务，样品信息如表 D.1 所示。

表 D.1 被测超高反射率光学薄膜的样品信息

| 样品编号     | 样品信息                 | 样品用途            |
|----------|----------------------|-----------------|
| UESTC-01 | K9 基底高反镜，工作波长 1064nm | 作为标准样品，进行吸收损耗测量 |
| UESTC-02 | 石英基底高反镜，工作波长 1064nm  | 作为标准样品，进行吸收损耗测量 |
| UESTC-03 | 高反镜，工作波长 633nm       | 积分球总散射损耗测量      |
| UESTC-04 | 高反镜，工作波长 1064nm      | 角分辨散射损耗测量       |
| UESTC-05 | 高反镜，工作波长 1064nm      | 角分辨散射损耗测量       |
| UESTC-06 | 高反镜，工作波长 1064nm      | 角分辨散射损耗测量       |

2、性能表征及测量结果

2.1 吸收损耗

先根据附录 C.3 使用 GB/T 38245-2019 规范的量热法测量标准样品的吸收损耗，再根据标准文档 7.3 节所述光热方法进吸收损耗测量，使用 UESTC-01 和 02 样品。

UESTC-01 样品的吸收损耗量热测量结果如图 D.1 所示，测量得到的吸收损耗为 48.6ppm。光热二维扫描测量结果如图 D.2 所示，测量得到的吸收损耗平均 49.2ppm，和量热法的结果吻合匹配。

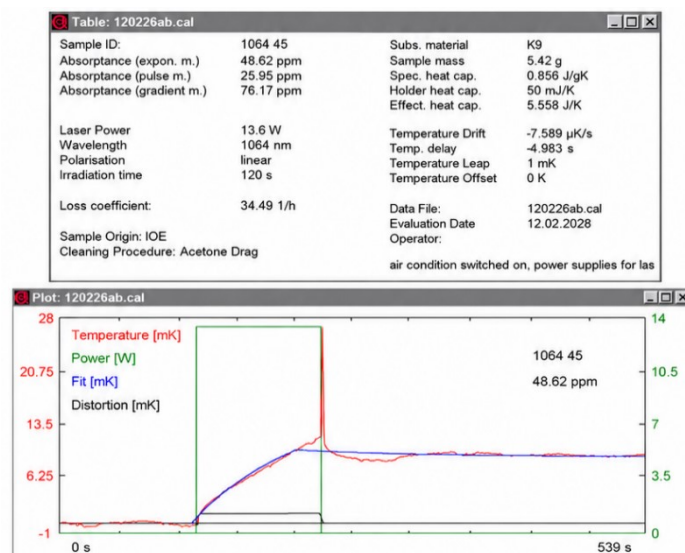


图 D.1 UESTC-01 样品吸收损耗量热测量结果

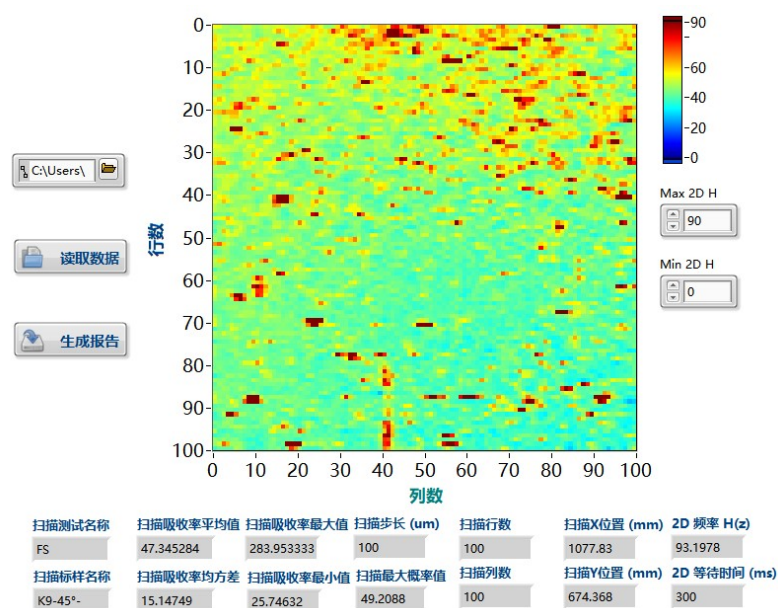


图 D.2 UESTC-01 样品吸收损耗光热测量结果

UESTC-02 样品的吸收损耗量热测量结果如图 D.3 所示，测量得到的吸收损耗为 19.2ppm。光热二维扫描测量结果如图 D.4 所示，测量得到的吸收损耗平均值 18.9ppm，和量热法的结果吻合匹配。

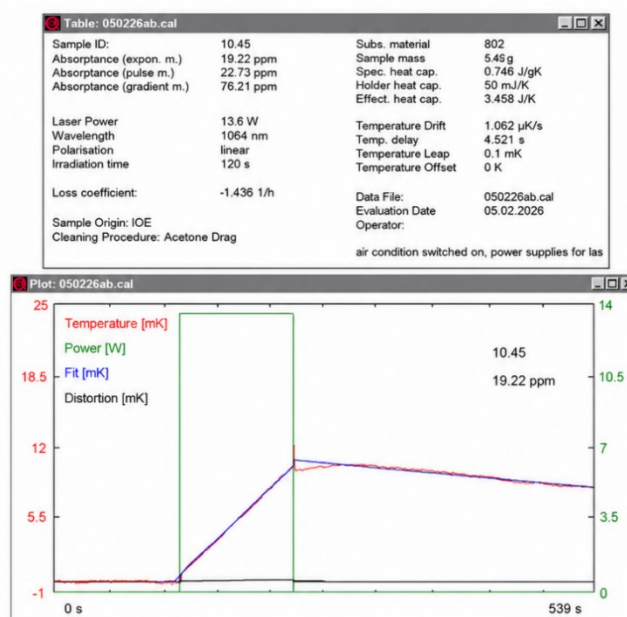


图 D.3 UESTC-02 样品吸收损耗量热测量结果

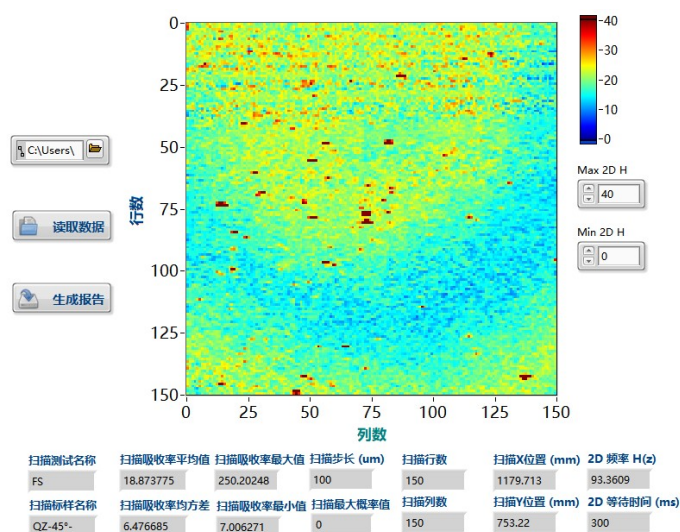


图 D.4 UESTC-02 样品吸收损耗光热测量结果

## 2.2 散射损耗

根据标准文档 7.4.1 节所述,使用积分球总散射测量方法,测量待测样品 UESTC-03 的散射损耗,得到其散射损耗二维扫描结果为: 平均值 2.65ppm; 最大值 2.77ppm; 最小值 2.59ppm。结果如图 D.5 所示。

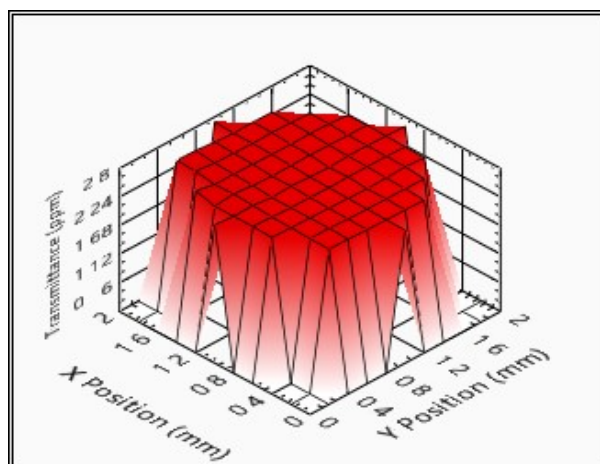


图 D.5 UESTC-03 的积分球总散射损耗二维测量结果

根据标准文档 7.4.2 节所述，使用角分辨法测量样品 UESTC-04、05、06 的散射损耗，得到的散射损耗 BRDF 如图 D.6、D.7、D.8 所示，积分得到总散射损耗见表 D.2。

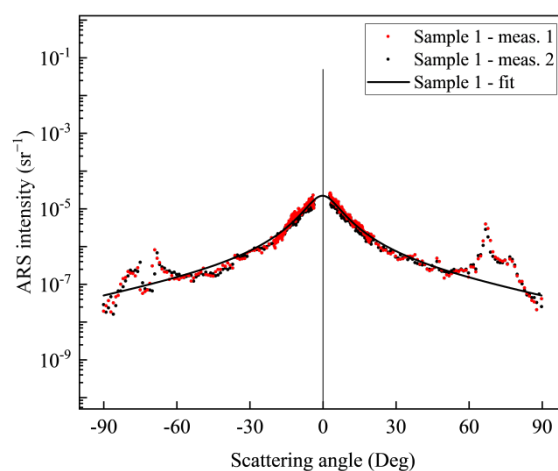


图 D.6 UESTC-04 角分辨散射损耗测量结果

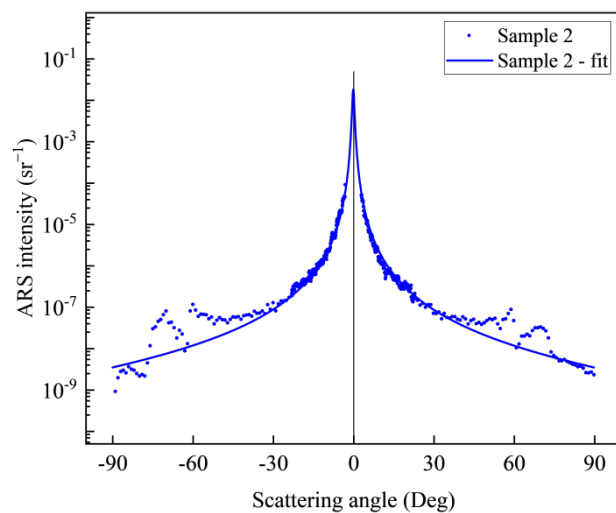


图 D.7 UESTC-05 角分辨散射损耗测量结果

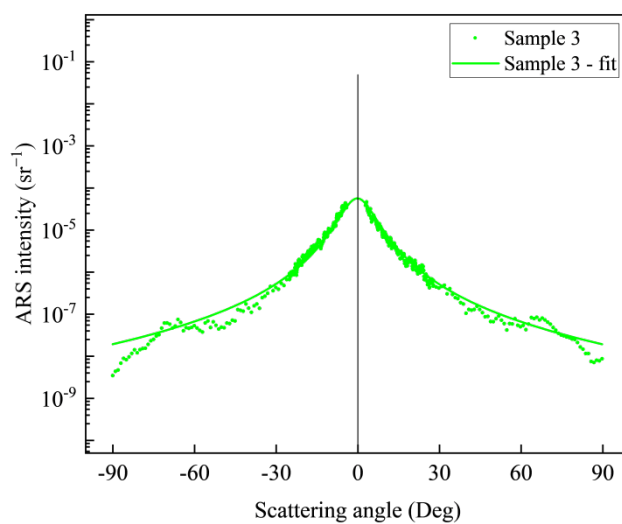


图 D.8 UESTC-06 角分辨散射损耗测量结果

表 D.2 UESTC-04、05、06 的角分辨散射损耗测量结果

| 样品       | 入射角 | 散射损耗积分结果 |
|----------|-----|----------|
| UESTC-04 | 0°  | 3.81ppm  |
| UESTC-05 | 0°  | 7.26ppm  |
| UESTC-06 | 0°  | 4.31ppm  |

附件 5

《量子技术 超高反射率光学薄膜性能表征及测量方法》

实验测试报告 5

1、待测样品

选择一块超高反射率光学薄膜样品作为待测样品。

表 E.1 被测超高反射率光学薄膜的样品信息

| 样品编号          | 样品信息               | 样品用途   |
|---------------|--------------------|--------|
| S2-0421TJPL01 | 高反镜，平面，工作波长 1550nm | 散射损耗测量 |

2、散射损耗性能表征及测量结果

根据标准文档 7.4.2 节所述，使用角分辨测量法测量样品的散射损耗，所用设备为速派光学自研的 MWS 多波长散射特性测量仪(Super Optics-MWS)。

首先使用栅格扫描，得到样品表面的缺陷和颗粒污染分布信息，如图 E.1 所示。根据栅格扫描的结果选取样品中心的洁净区域，进行双向反射分布函数 BRDF 测量。测试中的入射角 $\theta_i=10.0^\circ$ ，BRDF 测试曲线如图 E.2 所示。积分范围根据标准文档 7.4.2 节所述为  $3^\circ$ - $85^\circ$ ，数据分析得到总散射损耗为 14.73ppm。

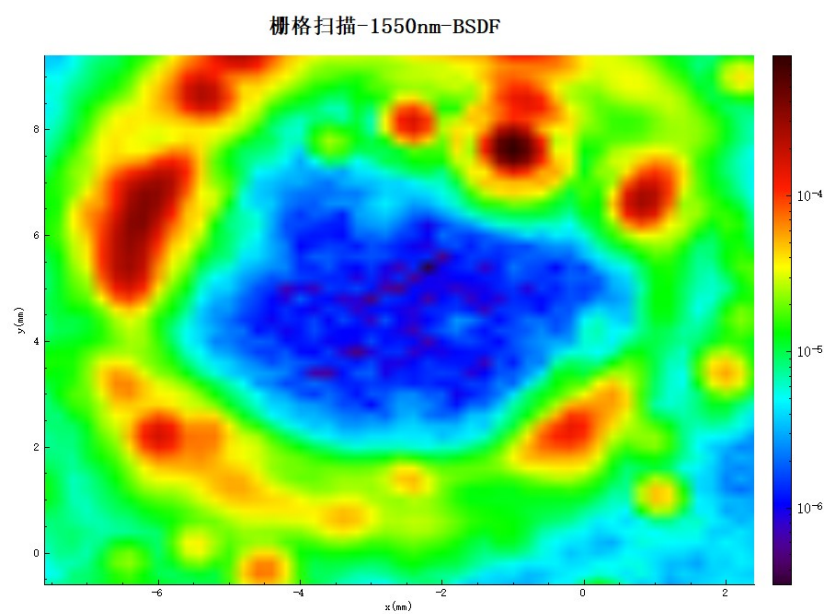


图 E.1 栅格扫描结果，可见样品中心区域洁净，无污染

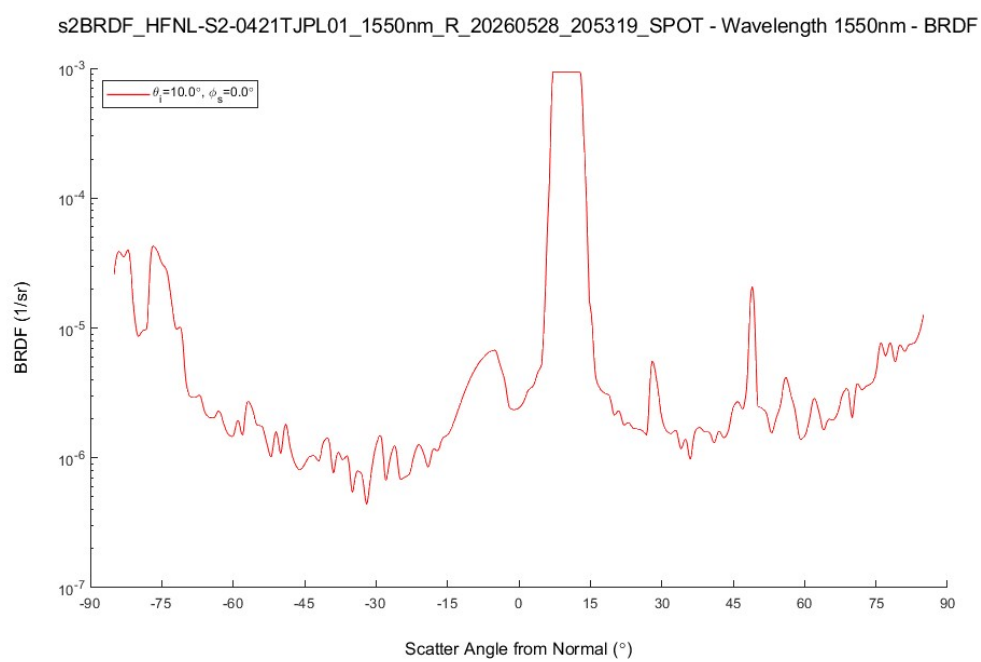


图 E.2 散射损耗 BRDF 测量结果