



团 体 标 准

T/CEATEC XXXX—XXXX

超构透镜 光学性能与相位分布测量方法

Test methods for optical performance and phase distribution of metalenses
(征求意见稿)

XXXX – XX – XX 发布

XXXX – XX – XX 实施

中国欧洲经济技术合作协会 发 布

目 次

前言	II
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 测试原理及方法	2
4.1 离轴干涉	2
4.2 多距离相位成像	2
5 测试环境与装置	2
5.1 测试环境	2
5.2 测试装置组成	2
6 离轴干涉方法测试步骤	3
6.1 准备工作	3
6.2 对焦与对准	3
6.3 干涉图像测量与相位提取	3
7 多距离相位成像方法测量步骤	4
7.1 准备工作	4
7.2 对焦与对准	4
7.3 多距离强度图像采集与相位恢复	4
8 数据处理与评定	4
8.1 焦距与波像差分析	4
8.2 基于相位分布和透射率分布的焦场计算与性能评价	4
9 测试报告	5
附录 A（资料性） 相位提取流程	6
A.1 离轴干涉相位提取流程	6
A.2 基于强度的相位提取方法	6

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。

本文件由中国欧洲经济技术合作协会提出并归口。

本文件起草单位：

本文件主要起草人：

本文件首次发布。

超构透镜 光学性能与相位分布测量方法

1 范围

本文件规定了超构透镜样品光学性能与相位分布的测试原理、测试条件、测试设备、测试步骤、数据处理及测试报告等内容。

本文件适用于超构透镜样品光学性能与相位分布的测试，包括但不限于透射式、反射式超构透镜，以及基于不同原理设计的具有不同功能与工作波段的超构透镜样品。

本文件中的焦场分布、点扩散函数（PSF）、聚焦效率、Strehl比等光学性能评价结果，基于测得的相位分布和透射率分布，通过自由空间传播计算获得，不涉及直接光功率测量方法。

2 规范性引用文件

本文件没有规范性引用文件。

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

超构透镜 metalens

由亚波长尺度结构单元阵列构成，通过调控结构单元的几何参数实现对光波相位、振幅或偏振的调制，并使出射光场在设计焦距位置发生汇聚、形成焦点的平面光学元件。

3.2

缺陷 defect

超构透镜表面局部区域中存在的划痕、污染，以及结构单元阵列的结构缺失、尺寸偏差等。

3.3

波前 wavefront

入射光经超构透镜样品调制后，在样品出射侧或指定测量平面上形成的等相位面。

3.4

波像差 wavefront aberration

实际波面与理想波面之间的差异。

3.5

有效孔径 effective aperture

在规定测试条件下，测得的超构透镜波前相位分布中具有有效相位信息的区域。

3.6

聚焦效率 focusing efficiency

焦平面内以焦斑中心为圆心、直径为3倍焦斑半高全宽的圆形积分区域内的光功率，与入射到超构透镜有效孔径内的光功率之比。

3.7

Strehl 比 Strehl ratio

实际焦平面峰值强度与相同有效孔径、焦距与归一化条件的理想透镜峰值强度之比。

3.8

干涉测量 interferometric measurement

通过使待测光场与参考光场发生相干叠加，记录形成的干涉强度分布，并由干涉条纹或干涉图计算获得待测光场相位分布的方法。

3.9

相位复原 phase retrieval

通过测量光场强度分布，并结合基于强度的相位提取方法反演获得光场相位分布的过程。

3.10

傅里叶空间 Fourier space

以空间频率变量表征光场振幅、强度或相位分布的数学空间。物体空间中的光场经傅里叶变换后，可在傅里叶空间中表示其对应的频谱分布。

3.11

超构表面 metasurface

由亚波长尺度结构单元周期性或非周期性排布形成的人工平面光学结构，可对入射光波的相位、振幅、偏振、色散等多维度光学参量进行灵活调控，超构透镜为具备聚焦功能的一类特殊超构表面。

4 测试原理及方法

4.1 离轴干涉

采用工作波长下具有高准直度的平行光入射激发样品。经样品调制后的出射光场与一束离轴斜入射的平面参考光发生干涉，形成干涉图。对采集得到的干涉图进行傅里叶变换，在傅里叶空间中选取并保留+1级频谱分量，经空间滤波及反傅里叶变换后，获得样品出射光场的波前相位分布。

4.2 多距离相位成像

4.2.1 采用工作波长下具有高准直度的平行光入射激发样品。在样品出射侧沿光轴方向设置多个测量平面，依次采集各测量平面处的光场强度分布，并记录各测量平面相对于样品参考面的传播距离。

4.2.2 根据采集得到的多距离强度分布，可采用基于计算成像的迭代算法，或基于强度传输方程的方法，计算获得样品出射波前的相位分布。

4.2.3 测量过程中，应根据样品参数、工作波长、数值孔径、焦距及探测器采样条件，确定测量平面的数量、间距和范围。测量平面数量的选取应以相位重建结果收敛为依据：当继续增加测量平面数量时，计算得到的样品相位分布变化应低于规定的相位测量精度要求。

5 测试环境与装置

5.1 测试环境

环境如下：

- a) 温度： $23\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ；
- b) 相对湿度： $45\% \pm 15\%$ ；
- c) 洁净度：优于 10000 级，避免灰尘对成像质量的影响；
- d) 杂散光：测试应在暗室中进行，背景光功率在测量波长范围内应低于信号光功率的 1%；
- e) 振动：测试平台应置于隔振台上，振幅范围由光学平台性能决定。

5.2 测试装置组成

超构透镜光学性能与相位分布测试装置应包括以下核心部件：

- a) 具有高准直性的平面波入射照明系统；
- b) 样品台：三维精密调节位移台（XYZ 平移）；样品台沿光轴方向具备高精度位移扫描能力，满足不同样品、不同测试方法的轴向采样精度需求；
- c) **成像光路**：将样品出射面或指定测量平面成像到探测器上的成像光路，其有效数值孔径应不小于被测样品的设计数值孔径或待测出射光场的最大数值孔径；
- d) 成像探测器：科学级 CMOS 或 sCMOS，像素尺寸应满足奈奎斯特采样定理；
- e) **偏振测量系统**：当样品设计或测试需求涉及偏振响应时，测试装置应配置偏振片、波片或其他等效偏振调控元件，用于设置和记录入射光与出射光偏振态；
- f) 数据处理系统：图像采集与分析软件；

g) 离轴干涉方法中，测量光路中应包含可调离轴角的离轴参考光路。

6 离轴干涉方法测试步骤

6.1 准备工作

6.1.1 按照装置示意图 1 搭建测试光路，确保样品光路各光学元件共轴，参考光路应以规定离轴角与样品出射光场在探测器面发生干涉。

6.1.2 安装超构透镜：将超构透镜安装于样品台上，注意区分单透镜与双面透镜的安装方向。对于双面超构透镜，需确认物侧透镜与像侧透镜的正确朝向。

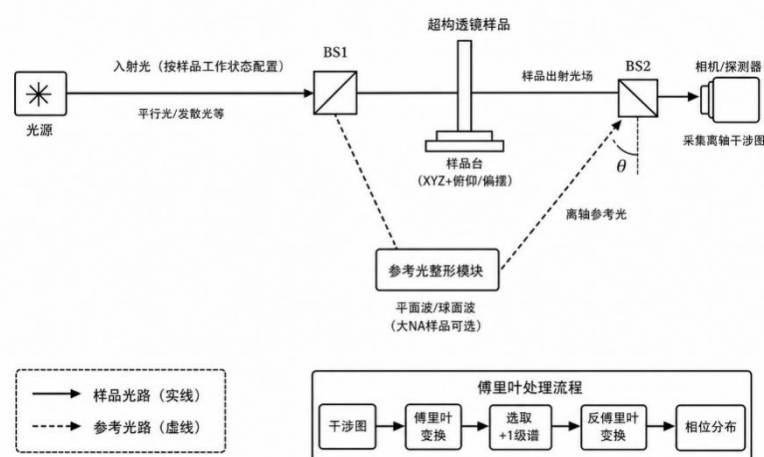


图 1 测试光路

6.2 对焦与对准

6.2.1 调节样品台的横向位置和轴向位置与俯仰角，使待测超构透镜样品位于相机视场中央，样品法向平行于光轴。

6.2.2 精调至最佳焦面，可使用图像清晰度评价函数辅助。

6.2.3 分别调节样品光路和参考光路的光强，使二者信号在探测器面上的强度处于同一量级，光强比宜控制在 1:1~1:4 范围内，保证干涉条纹具有较高对比度且探测器不发生饱和。

6.3 干涉图像测量与相位提取

6.3.1 根据待测偏振态调节入射光偏振态和出射检偏器方向；调节离轴参考光偏振态，使其在探测器面上的偏振态与经检偏器选取后的样品出射光偏振态一致。

6.3.2 关闭或遮挡参考光路，采集样品光强图像。

6.3.3 关闭或遮挡样品光路，采集参考光强图像。

6.3.4 同时打开样品光路和参考光路，采集离轴干涉图像。干涉条纹应清晰、稳定，且在探测器有效视场范围内具有足够的条纹对比度。

6.3.5 对预采集的干涉图像进行傅里叶变换，检查零级谱、+1 级谱和-1 级谱的分离情况。若+1 级谱与零级谱或-1 级谱发生重叠，应采取增大参考光离轴角、调整参考光曲率或减小探测面采样范围等方法，使各级频谱在傅里叶域内充分分离，使得+1 级谱与其他谱之间不产生重叠后重新采集。

6.3.6 取下超构透镜样品，保持光路条件不变的情况下，采集入射光与参考光的干涉图像，用于测量系统本底相位分布。

6.3.7 关闭或遮挡参考光路，采集无样品条件下的入射光强分布。

6.3.8 对样品在位和无样品条件下获得的离轴干涉图像分别进行傅里叶滤波与复振幅重建，通过相位展开及本底相位扣除获得超构透镜引入的相位分布。

6.3.9 将样品在位条件下测得的光强分布与无样品条件下测得的入射光强分布逐点相除，得到样品透射率分布。

7 多距离相位成像方法测量步骤

7.1 准备工作

7.1.1 按照装置示意图 2 搭建测试光路，确保各光学元件共轴。

7.1.2 安装超构透镜：将超构透镜安装于样品台上，注意区分单透镜与双面透镜的安装方向。对于双面超构透镜，需确认物侧透镜与像侧透镜的正确朝向。

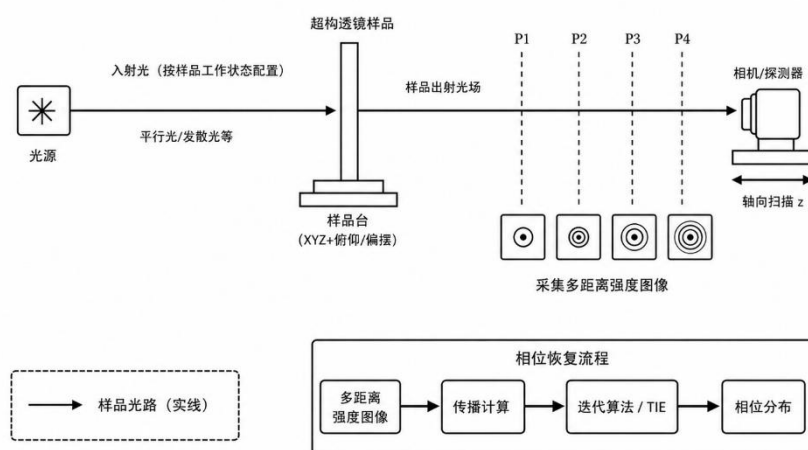


图 2 测试光路

7.2 对焦与对准

7.2.1 调节样品台的横向位置和轴向位置与俯仰角，使待测超构透镜样品位于相机视场中央，样品法向平行于光轴。

7.2.2 根据待测偏振态调节入射光偏振态和出射检偏器方向。

7.2.3 精调至最佳焦面，可使用图像清晰度评价函数辅助。

7.2.4 调节入射光强度使采集图像具有足够的信噪比，同时采用满足成像质量要求的较低入射光强。

7.3 多距离强度图像采集与相位恢复

7.3.1 从初始测量平面开始，沿光轴方向依次移动样品台、探测器或等效测量平面，采集各测量平面处的光场强度图像，并记录每个测量平面相对于样品参考面的轴向位置。轴向扫描范围宜覆盖样品出射面至焦点前后区域，测量平面数量不少于 4 个。对于高数值孔径超构透镜，宜适当增加采样平面数量并减小轴向步长，对于大数值孔径样品或焦区强度变化较快的样品，扫描范围宜覆盖焦点前后一定距离。采集过程中应保持入射光条件、曝光时间和光路状态稳定。

7.3.2 将探测器调整至样品共轭像面位置，测量样品透射光强分布。

7.3.3 在保持其他光路条件不变的情况下取下超构透镜样品，测量无样品条件下的入射光强分布。

8 数据处理与评定

8.1 焦距与波像差分析

8.1.1 样品焦距应根据测得的波前相位分布确定。对于每一个候选焦距，计算其对应的理想标准透镜

相位分布，并从测得的波前相位分布中扣除该标准相位分布，得到残余波像差分布。对波像差分布进行泽尼克多项式展开：当残余波像差中的离焦项（第四项）展开系数为零时，该候选焦距定义为样品焦距。在进行泽尼克展开时，如其波像差相位分布中存在 $0 - 2\pi$ 的相位折叠区域，应对其进行相位解包裹。

8.1.2 在 8.1.1 确定的样品焦距条件下，从测得的波前相位分布中扣除对应焦距的理想标准透镜相位分布，得到样品波像差分布。

8.1.3 对样品波像差分布进行泽尼克多项式展开。除另有规定外，泽尼克展开阶数宜取前 36 项，并给出各项泽尼克系数。除泽尼克系数外，结果还应包括波像差的峰谷值、均方根值等。必要时，可进一步给出扣除常数项、倾斜项和离焦项后的剩余波像差。

8.2 基于相位分布和透射率分布的焦场计算与性能评价

8.2.1 基于样品出射面强度分布与无样品条件下的入射光强度分布，计算样品透射率分布。

8.2.2 基于样品透射率分布与相位分布构建样品出射面的光场调制分布，使用自由空间衍射计算公式计算聚焦场强度分布。在规定入射照明条件下，于 8.1 确定的焦距位置处得到样品焦平面强度分布；对该强度分布进行背景扣除和归一化处理后，可作为样品点扩散函数（PSF）的评价结果。在获得焦平面光场强度分布后，聚焦效率按 3.6 的规定计算。

8.2.3 在 8.1 确定的焦距位置处，依据 8.2.2 得到的样品焦平面强度分布，并计算相同有效孔径、焦距和归一化条件下的理想透镜焦平面强度分布，按 3.7 计算样品的 Strehl 比。SR>0.8 时，可认为系统接近衍射极限。

9 测试报告

测试报告应至少包含以下内容：

- a) 基本信息：测试单位、测试人员、测试日期、环境条件；
- b) 样品信息：超构透镜编号、口径、设计 NA、设计波长、结构与材料；
- c) 测试条件：照明波长、入射光偏振态、出射检偏方向、探测器型号与像素尺寸；
- d) 测试结果：
 - 1) 有效孔径；
 - 2) 相位分布；
 - 3) 透射率分布；
 - 4) 焦距；
 - 5) 波像差与泽尼克展开系数；
 - 6) Strehl 比，聚焦效率；
 - 7) 测试不确定度/重复性指标：包括焦距等关键指标的重复测量波动范围。
- e) 结论与分析。

附 录 A
(资料性)
相位提取流程

A.1 离轴干涉相位提取流程

应符合以下要求：

- a) 对采集得到的离轴干涉图像进行二维傅里叶变换，获得傅里叶频谱分布；
- b) 在傅里叶空间选取包含样品相位信息的+1 级频谱分量，并采用合适的空间滤波窗口进行滤波；
- c) 对滤波后的+1 级频谱分量进行反傅里叶变换，获得样品复场分布；
- d) 对无样品条件下采集得到的背景离轴干涉图像按上述步骤进行相同处理，获得背景复场分布；
- e) 将样品复场分布与背景复场分布相除，得到扣除系统参考相位后的样品复场分布；
- f) 由扣除背景后的样品复场分布提取相位，得到样品波前相位分布。

A.2 基于强度的相位提取方法

应符合以下要求：

- a) 将各测量平面采集得到的强度图像，根据探测器像素尺寸、成像放大倍率和光路几何关系，投影到对应测量平面的实际光场坐标中，获得各测量平面处的实际光强分布；
- b) 根据样品工作波长、测量平面位置和采样间隔，建立不同测量平面之间的衍射关系。将各测量平面处的实际光强分布代入计算成像算法，反演获得样品出射面处的复场分布，并提取出样品出射面相位分布。计算成像算法可采用多平面迭代相位复原、基于强度传输方程的方法或其他等效相位复原方法；
- c) 将样品出射面强度分布与测得的入射面强度分布相除，得到样品透射率分布。

参 考 文 献

- [1] GB/T 44221—2024 光学系统波前像差的测定 夏克-哈特曼光电测量法
 - [2] GB/T 41869.3—2024 光学和光子学 微透镜阵列 第3部分：光学特性测试方法
-