ICS
CCS 点击此处添加 CCS 号

T/

团 体 标 准

T/CSOE 0026—2026

基于超快激光技术加工的 X 射线透镜性能要求与检测方法

Technical requirements and inspection methods of ultrafast laser ablation of X-ray lenses

（报批稿）

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

发 布

目　　次

前言 II
引言 III
1　范围 4
2　规范性引用文件 4
3　术语和定义 4
4　一般要求 5
5　技术要求 6
6　检测方法 7
附录 A（规范性）　加工参数记录表 9
附录 B（规范性）　检测结果记录表 10
附录 C（规范性）　检测报告要求 11
参考文献 12

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。

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这些专利的责任。

本文件由中国光学工程学会提出并归口。

本文件起草单位：中国科学院上海高等研究院，中国科学院高能物理研究所，中国科学院上海光学精密机械研究所，中国工程物理研究院流体物理研究所，上海科技大学，上海大学，西北工业大学，中国科学院宁波材料工程技术研究所，北京高压科学研究中心，无锡齐勇半导体技术有限公司。

本文件主要起草人：董晓浩，张增艳，张君瀚，李明，张伟伟，廖洋，高文海，孟立民，马云灿，翁祖谦，冯杰才，张仕进，江南，王寓越，柳祝平，祝万钱，冷雨欣。

本文件首次发布。

引　言

X射线透镜是同步辐射光源及自由电子激光等大科学装置中的核心聚焦元件。应用中常需数十片透镜组合装配使用，对面形偏差、尺寸一致性及表面质量要求极高。

早期多采用铍、铝等金属材料压铸加工制造，现逐步向超快激光加工金刚石、蓝宝石、碳化硅等硬脆材料发展。

目前国内外尚无针对超快激光加工X射线透镜的规范标准，亟需对设备配置、基底处理、烧蚀工艺、清洗检测及过程记录等环节制定标准，提升透镜的加工一致性，推进产业化进程。

基于超快激光技术加工的X射线透镜性能要求与检测方法

1 范围

本文件规定了X射线透镜的超快激光加工的材料、设备、工艺要求和一般要求，技术要求、检测方法及检测报告等。

本文件适用于采用X射线透镜的超快激光加工制造。

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 30863 眼面部防护 激光防护具
GB 44703 光辐射安全通用要求
GB 12348 工业企业厂界环境噪声排放标准
GB/T 1031 产品几何技术规范（GPS）表面结构：轮廓法 表面粗糙度参数及其数值
GB/T 1224 几何光学术语、符号
GB/T 2423.10 环境试验 第2部分：试验方法 试验Fc：振动(正弦)
GB/T 2831 光学零件的面形偏差
GB/T 12964 硅单晶抛光片
GB/T 15313 激光术语
GB/T 10320 激光设备和设施的电气安全
GB/T 18490.1 机械安全 激光加工机第1部分：通用安全要求
GB/T 26332.1 光学和光子学 光学薄膜
GB/T 27418 测量不确定度评定和表示
GB/T 30858 蓝宝石单晶衬底抛光片
GB/T 33523.2 产品几何技术规范(GPS) 表面结构：区域法 第2部分：术语、定义及表面结构参数
GB/T 34874.6 产品几何技术规范(GPS) X射线三维尺寸测量机 第6部分：工件的检测方法
GB/T 41572 脉冲激光时域主要参数测量方法
GB/T 41869.2 光学和光子学 微透镜阵列 第2部分：波前像差的测试方法
GB/T 47243 光学和光子学 光学元件 复杂曲面光学元件几何参数测试方法
GB/T 47404 碳化硅单晶
GB/T 47902 金刚石单晶抛光片

3 术语和定义

文中有关激光的术语由GB/T 15313界定，超短脉冲激光、脉冲持续时间来源于GB/T 41572，通光孔径来源于GB/T 26332.1，面形偏差、总面形偏差均方差、峰谷值来源于GB/T 2831，表面粗糙度来源于GB/T 1031，焦点来源于GB/T 1224，波前像差来源于GB/T 41869.2，算术平均高度（Sa）、均方根高度（Sq）来自GB/T 33523.2。

以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

X射线透镜 X-ray refractive lens

基于折射效应，对X射线实施相位调制，实现光束聚焦或准直，获得微米及以下尺度聚焦光斑的微型X射线光学元件，其结构如图1所示，图中D为通光孔径，r_0为顶点处曲率半径，d为顶点处厚度，t为矢高，L为透镜整体厚度。

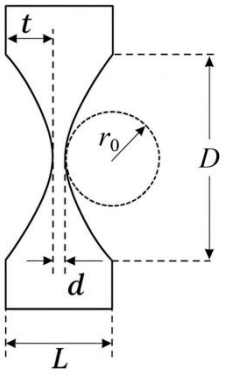

图 1　X 射线透镜示意图

3.2

X 射线组合透镜 X-ray compound refractive lens (CRL)

多个X射线透镜沿光轴串联排布，叠加聚焦能力，实现X射线束聚焦或准直的折射型光学元件，其结构如图2所示。

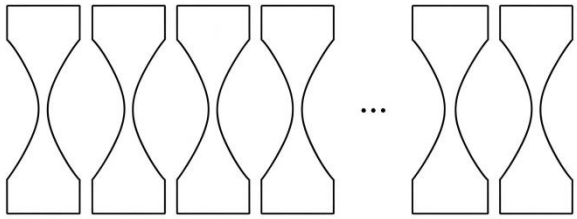

图 2　X 射线组合透镜示意图

3.3　**聚焦效率 focusing efficiency**

聚焦光斑半高全宽（FWHM）区域内汇集的X射线能量与入射至透镜有效通光孔径的总X射线能量的比值。

3.4　**焦深 depth of focus**

在焦点前后，光斑尺寸、能量密度劣化程度在工艺允许范围内的轴向区间长度。

注：对于理想高斯光束，工程上以光斑的半高全宽（FWHM）增大至束腰FWHM的$\sqrt{2}$倍作为焦深边界，该轴向总长度等于光束共焦参数。

4　一般要求

4.1　安全要求

4.1.1　电气安全

设备及电气安全按照GB/T10320执行。

4.1.2　激光辐射安全

激光辐射安全防护按照GB 44703执行。

4.1.3　机械安全

机械安全按照GB/T 18490.1执行。

4.1.4　防护眼镜

激光加工过程中佩戴防护眼镜，按照GB 30863执行。

4.1.5　噪音控制

设备运行厂房的噪音控制按GB 12348执行。

4.2 基底材料要求

X射线透镜基底材料应符合下列规定：

1） 单晶金刚石性能应符合 GB/T 47902；
2） 单晶硅性能应符合 GB/T 12964；
3） 蓝宝石性能应符合 GB/T 30858；
4） 碳化硅性能应符合 GB/T 47404。

4.3 加工设备

超快激光加工设备主要包括飞秒激光器，以及样品多维运动台等，应符合以下要求：

1） 激光输出功率 ＞15 W；
2） 脉冲宽度 ＜300 fs；
3） X/Y 轴定位精度：±0.2 μm；
4） X/Y 轴重复定位精度：±50 nm。

4.4 加工工艺

1） 加工操作应按照 GB/T 18490.1 执行。
2） 加工基底表面应无明显划痕、气泡等，粗糙度 ＜0.5 μm。尺寸公差应控制在±0.05 mm 以内。
3） 开机前应对超快激光加工设备进行预热（预热时间不少于 0.5 h），校准激光焦点位置；加工工件表面需置于激光焦深范围内，避免光斑尺寸变化导致透镜单元面形畸变，观测同轴显微监测系统清晰度，确认设备状态正常。
4） 加工前应记录超快激光器关键技术参数与 X 射线微透镜加工关键工艺参数，并填写附录 A；加工全过程应同步开启气体吹扫装置和除尘装置。
5） 加工过程中维持激光频率、功率稳定：功率波动在±1%范围内，脉冲重复频率波动在±0.1%范围内。
6） 加工后关闭超快激光加工装置及相应气体吹扫及除尘装置。
7） 超快激光加工后的 X 射线微透镜应在去离子水或乙醇中超声清洗，去除表面残留碎屑与粉尘，避免其给检测带来的影响。
8） 若需要提高微透镜表面光洁度，可进行抛光处理。
9） 工艺开发阶段，根据设置不同的激光器参数和加工微透镜的关键参数来摸索工艺，包括但不限于附录 A 中的内容。

5 技术要求

5.1 几何尺寸

外形尺寸为几个mm的圆形或方形的基底（通常为3×3×1 mm的方形或Φ3×1 mm的圆形），单片透镜轮廓一般为双面曲面，通常为抛物面，其顶点曲率半径在几十至1000 μm，顶点壁厚通常为几十μm，通光孔径一般为几百μm。

5.2 表面形貌

面形偏差均方差(RMS)通常小于0.5 μm，峰谷值(PV)通常不超过5 μm，粗糙度通常小于0.5 μm。

5.3 X 射线光学性能

波前像差通常小于λ/20（λ为工作波长），聚焦光斑根据应用需求，通常小于10 μm，聚焦效率通常不低于理论值的90%，焦深根据实际应用来决定。

5.4 环境要求

5.4.1 温度、湿度与防振

超快激光加工设备应设置独立隔音、防振操作间，环境条件应符合GB/T 2423.10。操作间应保持洁净，环境温度应保持在(25 ± 2) ℃，相对湿度控制在40% RH～60% RH。

5.4.2 吹扫及除尘

配置吹扫和除尘设备，吹扫设备保证加工过程中产生的烧蚀粉尘等物质及时离开工件加工位置不影响激光加工。除尘设备保证加工过程的烧蚀粉尘等物质被及时抽除。

6 检测方法

6.1 几何尺寸

6.1.1 整体外形尺寸

采用分辨率不低于10 μm的数显千分尺或影像测量仪测量基底长、宽、厚尺寸；采用直角尺与塞尺测量棱边垂直度。测量结果不确定度按GB/T 27418的规定执行。

6.1.2 单元轮廓尺寸

采用白光干涉仪或激光共聚焦显微镜对透镜表面进行三维扫描，采用回转抛物面模型对有效通光孔径内三维点云进行最小二乘拟合，求解顶点曲率半径、矢高、顶点壁厚、通光孔径及曲面光轴向量；每个透镜单元测量3次，取算术平均值，测试与参数评定参照GB/T 47243。

采用X射线CT对透镜进行三维重建，检测流程参照GB/T 34874.6。提取前后光学曲面点集，依据最小二乘准则分别拟合前后两个曲面，获取两曲面光轴向量v_1、v_2与顶点坐标$P_1(x_1, y_1, z_1)$、$P_2(x_2, y_2, z_2)$。前后两曲面的光轴夹角θ与顶点横向偏移量Δ分别由公式(1)和公式(2)所示。

$$\theta = \cos^{-1}\frac{V_1 \cdot V_2}{|V_1| \cdot |V_2|} \quad (1)$$

$$\Delta = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2} \quad (2)$$

6.2 表面形貌

6.2.1 面形偏差

采用激光共聚焦显微镜对有效通光孔径进行全口径扫描，得到实测高度数据集。剔除坏像素、饱和点、孔径外夹持区域后，设有效采样点总数为N，第i个点的高度为H_i。采用多项式进行最小二乘法拟合，得到拟合曲面在第i个点处的拟合高度为F_i。

每个采样点相对于最优拟合抛物面的面形残差d_i的计算公式如下：

$$d_i = H_i - F_i \quad (1)$$

峰谷值PV的计算公式如下：

$$PV = d_{max} - d_{min} \quad (2)$$

总面形偏差均方差RMS的计算公式如下：

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} d_i^2} \quad (3)$$

6.2.2 表面粗糙度

采用白光干涉仪开展表面粗糙度测试，在元件有效通光孔径范围内选取 3 处典型评价区域，分别位于透镜顶点、通光孔径中间环带、通光孔径边缘。每个区域扫描范围不小于50 μm×50 μm，测试与参数计算参照GB/T 33523.2，分别计算得到单个区域的算术平均高度$Sa(i)$、均方根高度$Sq(i)$，再对3个区域结果取算术平均值，如公式(6)和(7)所示，作为该元件最终的粗糙度评价参数。

$$S_a = \frac{1}{3}\sum_{i=1}^{3} S_a(i) \quad (1)$$

$$Sq = \frac{1}{3}\sum_{i=1}^{3} S_q(i) \quad (2)$$

6.3 X 射线光学性能

6.3.1 波前像差

在同步辐射光束线或X射线试验平台上，采用在线波前检测法，在额定工作条件下测量透射波前的相位分布，并计算RMS波前像差。测量方法参照GB/T 41869.2中规定的夏克-哈特曼测量方法。

6.3.2 聚焦光斑与聚焦效率

采用X射线CCD探测器或闪烁体荧光成像系统采集聚焦光斑图像；沿光轴移动探测器，将探测器平面调整至X射线透镜焦深区间内，再采集光斑图像，通过高斯拟合计算光斑FWHM；积分光斑范围内的能量与入射总能量，计算聚焦效率η。聚焦光斑尺寸也可采用刀口法等替代方法完成测量。

6.3.3 焦深

在额定工作能量下，沿光轴等步长移动X射线探测器，连续采集多组轴向位置的聚焦光斑；以光斑FWHM增大至最小光斑FWHM直径的$\sqrt{2}$倍为判定标准，记录满足条件的光轴起止位置，两位置轴向差值即为透镜焦深，单位为μm。

6.4 环境适应性

如必要，将试样置于高低温试验箱内，以3℃/min速率升降温；-40℃保温2 h，升温至70℃保温2 h为一个循环，共进行5次温度循环。保温时间自箱内温度达到设定值后开始计时。循环结束后，试样在常温环境下恢复2 h，进行外观检查并复测附录B所示的光学性能参数，计算性能变化率，并按照附录C的要求出具检测报告。

附 录 A
（规范性）
加工参数记录表

表 A.1 超快激光加工设备及透镜加工参数记录表

1	基本信息			
	零部件名称		零部件图样代号/型号	
	批次/数量		接收时间	
2	a) 超快激光器关键参数			
	设备型号		输出功率（W）	
	激光波长（nm）		激光脉冲宽度（fs）	
	脉冲重复频率（kHz）			
	b) 样品多维运动台关键参数			
	X/Y 轴定位精度		X/Y 轴定重复定位精度	
3	加工工艺参数			
	激光运动模式		单层进给量（μm）	
	加工总层数			
4	辅助装置运行记录			
	气体吹扫装置型号		吹扫气体种类	
	吹扫气压（MPa）		除尘装置型号	
	除尘装置运行状态	□正常 □异常		
5	附件：激光器出厂校准报告、设备点检单、产品图纸			
	加工人员： 记录人员： 复核人员： 加工日期： 存档编号：			

附 录 B
（规范性）
检测结果记录表

表 B.1 X 射线透镜检测记录表

1	样品信息			
	透镜编号/批次		零部件图样代号/型号	
	批次数量		接收时间	
2	基底材料（非必须）			
	晶向偏差（°）		内部裂纹（μm）	
	孔洞缺陷（μm）			
3	几何尺寸			
	(a) 整体外形尺寸			
	长、宽、厚 mm		棱边垂直度	
	(b) 单元轮廓尺寸			
	曲率半径（μm）		矢量（μm）	
	顶点壁厚（μm）		通光孔径（μm）	
4	表面形貌			
	(a) 面形偏差			
	总面形偏差均方差（nm）		总面形峰谷值 PV（μm）	
	(b) 表面粗糙度			
	算术平均高度（Sa）		均方根高度（Sq）	
5	X 射线光学性能			
	X 射线光子能量（keV）		X 射线发散角度（mrad）	
	透射波前 RMS（μm）		聚焦光斑 FWHM（μm）	
	焦深（μm）		聚焦效率η（%）	
6	环境适应性（非必须）			
	高低温循环后性能变化率（%）			
7	附件：检测设备校准证书、原始检测图谱			
	检测人员： 记录人员： 复核人员： 检测日期： 存档编号：			

附 录 C
（规范性）
检测报告

检测报告应包括以下信息（如适用）。

类别	信息内容	备注
一般信息	检测设备的校准日期、校准程序和校准不确定度评估	
	检测日期	
	检测机构的名称和地址	
	相关认证	
	检测人员的姓名	
被测透镜信息	透镜类型	
	基底材料	
	制造商	
	型号或零部件图样代号	
	批次与序列号	
检测条件	采用的检测方法	
	检测设备： 白光干涉仪或激光共聚焦显微镜：制造商和型号； 数显千分尺或影像测量仪：制造商和型号； X 射线 CT 装置：制造商和型号； X 射线试验平台及探测器：制造商和型号； 高低温试验箱：制造商和型号。	
	测量参数：扫描范围、采样间距、测量点数、放大倍率等	
	测量时的环境条件：温度和相对湿度	
检测结果	外形尺寸和棱边垂直度以及不确定度	
	单元轮廓尺寸：曲率半径、矢高、顶点壁厚、通光孔径、光轴夹角和顶点横向偏移量	
	面形偏差：总面形偏差均方差（RMS）和峰谷值（PV）	
	表面粗糙度：算术平均高度（Sa）和均方根高度（Sq）	
	X 射线光学性能：透射波前 RMS、聚焦光斑 FWHM、焦深和聚焦效率	
	环境适应性（适用时）：高低温循环后的性能变化率	

参 考 文 献

[1] T/CIET 1616 基于飞秒激光直写的微光学元件制备技术要求