

T/JLA

福建省计量测试学会团体标准

T/XXX XXXX—XXXX

光学镜片亚表面缺陷检测 光学相干法

Detection of Subsurface Defects in Optical Lenses - Optical Coherence Method

(征求意见稿)

XXXX - XX - XX 发布

XXXX - XX - XX 实施

福建省计量测试学会 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 检测原理 2

 4.1 光学相干层析法 2

 4.2 检测方法分类 2

5 检测条件 3

 5.1 检测环境 3

 5.2 被测样品 3

6 测量设备 3

7 检测步骤 3

 7.1 测量前准备 3

 7.2 群折射率值预输入 3

 7.3 样品测量 4

 7.4 测量要求 4

 7.5 结果有效性判定 4

8 测量数据处理 4

 8.1 干涉信号处理 5

 8.2 图像阈值分割 5

 8.3 图像形态学处理 5

 8.4 亚表面缺陷体积计算 6

 8.5 亚表面缺陷横向面积计算..... 6

 8.6 亚表面缺陷深度尺寸计算..... 6

 8.7 亚表面缺陷深度位置计算..... 7

9 测量报告 7

附录 A（资料性） 光学玻璃材料群折射率换算 8

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。

本文件由福州大学提出。

本文件由福建省计量测试学会归口。

本文件起草单位：福州大学、福建福光股份有限公司、厦门市计量检定测试院。

本文件主要起草人：钟舜聪、张秋坤、梁伟、何文波、肖维军、沈在钦。

光学镜片亚表面缺陷检测 光学相干法

1 范围

本文件规定了采用光学相干法检测光学镜片亚表面缺陷的检测原理、检测装置、检测记录及检测报告。

本文件适用于用光学相干法进行光学镜片的亚表面缺陷检测。

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/T 13962 光学仪器术语

GB/T 44926 纳米技术 微区表面及亚表面表征 光学暗场共焦显微法

GB/T 44078 光电系统中光学中心间距的测定 低相干干涉测量法

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

光学镜片 optical lens

指用于制作各种光学仪器或用作光学系统元件的透镜或反射镜。

3.2

亚表面 subsurface

固体材料表面以下数百纳米至数百微米范围内具有光学透明度的区域。

[来源：GB/T 44926-2024, 3.1]

3.3

亚表面缺陷 subsurface defect

透镜表面及表面以下数百纳米至数百微米范围内的微小裂纹、气泡、夹杂物或不规则结构。

3.4

低相干 low coherence

光的相干长度短。

[来源：GB/T 44078-2024, 3.3]

3.5

干涉 interference

两束或两束以上的光波在重叠区相互加强和减弱的现象。

[来源：GB/T 13962-2009, 4.8]

3.6

样品光路 sample light path

低相干测量时，发生干涉的两束光波所在光路中，包含被测样品的光路。

3.7

参考光路 reference light path

低相干测量时，发生干涉的两束光波所在光路中，不包含被测样品的光路。

3.8

光程 optical path

光在介质中传播的几何光路与该介质的折射率之乘积。

[来源：GB/T 13962-2009, 2. 39]

3. 9

折射率 refractive index

光线在真空中的相速度与光在介质中的相速度之比。

[来源：GB/T 13962-2009, 3. 115]

3. 10

群折射率 group refractive index

光线在真空中的群速度与光在介质中的群速度之比。

4 检测原理

4. 1 光学相干层析法

基于光学相干法进行光学镜片三维层析成像以检测镜片亚表面缺陷的检测原理示意图见图1。

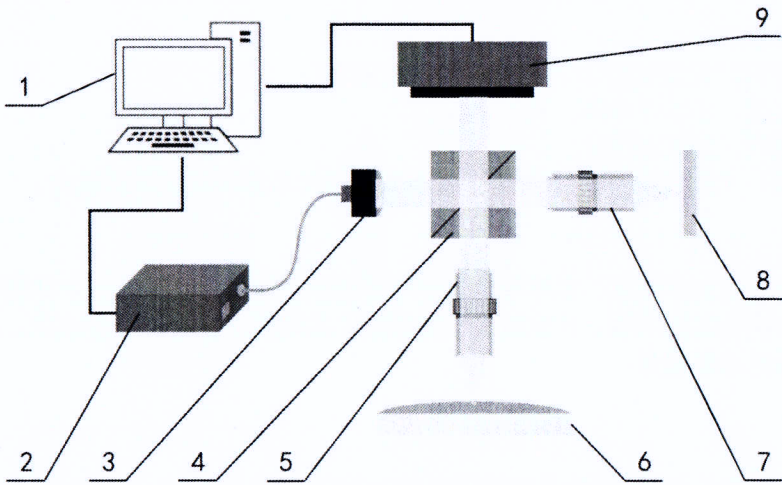


图1 光学镜片亚表面缺陷光学相干检测法原理图

标引序号说明

1——电脑；2——光源；3——光纤准直器；4——空间耦合器；5——显微物镜；6——被测样品；7——显微参考镜；8——反射镜；9——光探测器

将宽带光源经分束器分光后，一束作为参考光照射至参考镜返回，另一束作为探测光照射至待测镜片后携带镜片结构信息返回。当两光路光程差不大时，返回的两束光束经分束器耦合后发生干涉现象并被探测器以光谱信号的形式接收。光谱干涉信号表现为按波数均匀振荡的规律，振荡频率与参与干涉的两束光的光程差成正比。若样品为多层结构，则多层结构的各界面的返回光都与参考光发生干涉，生成多频光谱干涉信号。因此，对于采集到的干涉光谱信号，将其按波数空间均匀排列后进行傅里叶变换处理，其傅里叶频谱将与样品的轴向结构对应，通过坐标对应后就可以获得样品的内部结构，结合适当的扫描方式，可实现待测物的三维层析成像式检测。根据检测形式的不同，分为点式光学相干层析系统、线式光学相干层析系统和面式光学相干层析系统。

4. 2 检测方法分类

4. 2. 1 点式光学相干层析检测

点式光学相干层析系统，一次仅测量一个点的轴向结构。宽带光源发出的光束聚焦成一个点照射至样品，由线阵探测器做成的光谱仪采集信号。需要结合机械扫描结构进行XY扫描获得三维层析图像。一般采用光纤耦合器作为干涉结构，整个设备结构最为简单，体积小。

4. 2. 2 线式光学相干层析检测

线式光学相干层析系统，一次测量一条线的轴向结构，瞬时获得待测样品的剖面图像。宽带光源发出的光束聚焦成一个条线照射至样品，由面阵探测器做成的线光谱仪采集信号。需要一维的机械扫描就可获得三维层析图像。一般采用空间分束器作为干涉结构。

4.2.3 面式光学相干层析检测

面式光学相干层析系统，一次即可测量面区域的轴向结构，瞬时获得待测样品的三维层析图像。面式系统采用宽带扫频光源，每个瞬时仅发射一个波长的光束进行探测，且光束的波长随时间变化，一次测量周期，光束的波长从起始波长完整变化至截止波长。光束聚焦成一个区域光斑照射至样品，由高速面阵探测器采集信号。面式光学相干层析系统无需机械扫描就可获得三维层析图像。一般采用空间分束器作为干涉结构。

5 检测条件

5.1 检测环境

检测环境要求如下：

- 应在室内，常压条件下，无影响测量的振动；
- 相对湿度：不大于 60%；
- 环境温度：25℃±5℃；
- 洁净度：工作环境万级，测试区域局部根据样品特殊测试需求确定。

5.2 被测样品

被测样品可是由光学玻璃、光学晶体、硅片等材料制成的平面、球面、非球面形状的光学镜片。光学镜片待测表面应为抛光表面，且非镀膜。光学镜片表面清洁度应不影响测量。测量前应提供样品的光学结构、材料或折射率信息。

6 测量设备

根据图1的光学镜片亚表面缺陷检测原理示意图搭建光学相干三维层析成像检测装置。测量设备应具有样品折射率参数输入和三维层析结构显示功能。实验设备参数应符合表1要求。

表1 试验设备所需条件

横向分辨率 μm	轴向分辨率 μm	测量深度 μm	系统信噪比 dB
≤ 2	≤ 2	≥ 500	60 dB

测量设备参数校准可使用标准样品进行校准。横向分辨率可由线距标准样板进行测试比对校准。轴向分辨率和测量深度可由台阶标准样板进行测试比对校准。系统信噪可由采用金属反射镜做样品，直接观察干涉信号的谱域变换结果获得。测量设备参数应定期校准，并在有效期内。若校准已超过有效期，应采用校准器校准设备后使用。

7 检测步骤

7.1 测量前准备

测量前，需进行如下准备：

- 测量前应将待测样品表面进行预处理，包括空气清洗或根据镜片材质选择相应的清洁溶液擦洗，直至光学镜片表面无明显污渍。
- 确认测量设备信息，包括：工作波长范围、横向分辨率、探头倍率等。

7.2 群折射率值预输入

应预先查询材料在测量系统工作波段内的群折射率信息。若样品的群折射率未知，应按照附录A的方法通过折射率换算得到。

7.3 样品测量

点式和线式系统样品测量过程如下：

- a) 将镜片放置在调整台上，使得待测镜片光轴平行于测量光轴。
- b) 打开测量系统，遮挡参考光路使得仅样品光路的光信号返回被接受。当光谱信号最强时时，样品放置处在最佳工作距离。
- c) 观察干涉信号强度，若干涉信号最大值小于满量程 1/3 或过曝，则适当调整探测器曝光时间。以干涉信号强度达满量程 1/2~2/3 最佳。
- d) 设置扫描步长和扫描距离，开始测量。逐步记录光谱数据。
- e) 面式样品测量过程如下：
- f) 将镜片放置在调整台上，使得待测镜片光轴平行于测量光轴。
- g) 打开测量系统，将扫频光源组件设置为非扫频模式，调整样品表面与探头的间距，观察相机实时拍照的图像。当清晰显示光学镜片表面图像时，样品放置处在最佳工作距离。
- h) 将扫频光源切换为扫频模式，完整扫描整周期波长，若探测器接收的所有图片中最亮的图片最强信号小于满量程 1/3 或过曝，则适当调整曝光时间。以干涉信号图片的最大值达满量程的 1/2~2/3 最佳。
- i) 将扫频光源切换为扫频模式，设置扫频速率和高速相机采集帧率，开始测量。光源波长完整变化一个周期记录为一组数据。

7.4 测量要求

光学镜片全表面采取抽样检测，抽样区域位置选择按图2描述选择，每个被抽样区域不小于1 mm×1 mm。

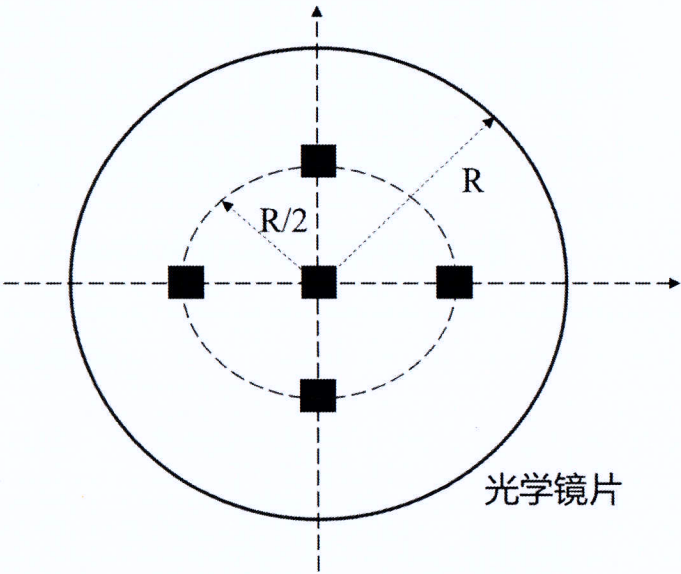


图2 光学镜片亚表面缺陷抽检区域示意图

7.5 结果有效性判定

根据测量设备显示的干涉信号，进行测量结果的有效性判定。若干涉信号最强处发生光过曝现象，则认为测量结果无效。应调整探测器曝光时间，并按照7.3重新测量。结果有效性判定情况应在测量报告中体现。

8 测量数据处理

8.1 干涉信号处理

对获取的三维数据阵列逐点进行处理，处理过程为波数空间均匀化插值后进行快速傅里叶变换（FFT）。将获得的三维数据XY方向乘以横向分辨率，Z方向乘以轴向分辨率，获得三维层析数据，并以三维图像的形式呈现。该部分过程可由设备内置程序运行获得。

8.2 图像阈值分割

选取合适阈值对三维图像做二值化分割，获得亮表面、亮缺陷和暗背景二值化图像。

8.3 图像形态学处理

对二值化图像进行形态学处理，以形态学处理后的二值化图像中的连通域来表征缺陷。如图3所示，每一个网格表示三维图像的一个像素，透明区域表示图像背景，上面平面黑色连通区域为光学镜片表面，除镜片表面外黑色连通区域为亚表面缺陷。亚表面缺陷的像素体积大小可通过计算缺陷像素点个数获得。亚表面缺陷横向面积可由缺陷在XY平面的投影像素面积大小计算获得，如图4所示。亚表面缺陷的深度位置和深度尺寸信息可由缺陷在YZ/XZ平面的投影的最大Z像素位置以及最小Z像素位置获得，如图5所示。

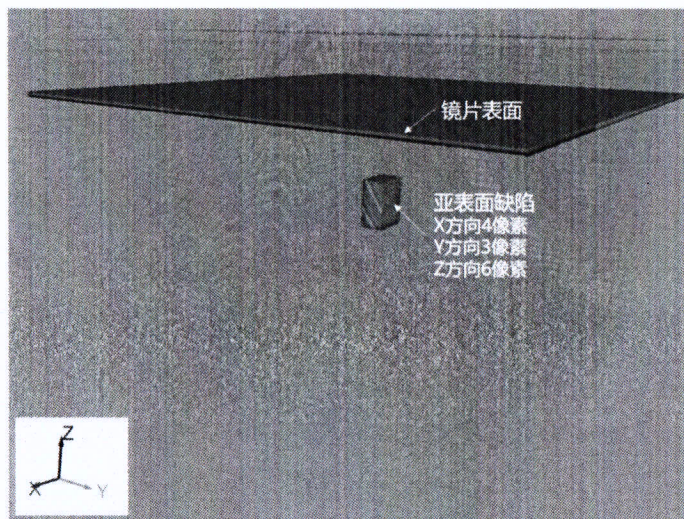


图3 亚表面缺陷三维层析图像示意图

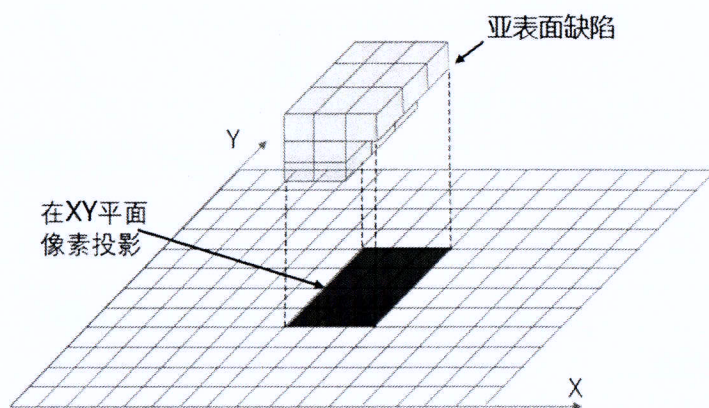


图4 亚表面缺陷横向面积投影示意图

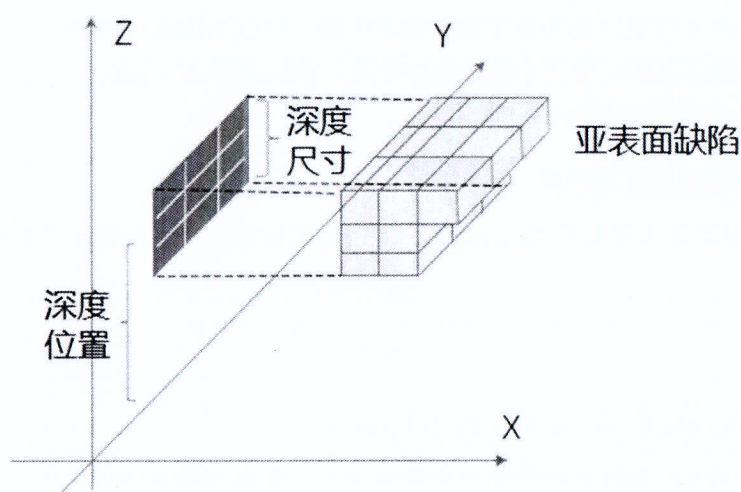


图5 亚表面缺陷深度位置与深度尺寸投影示意图

8.4 亚表面缺陷体积计算

将亚表面缺陷的像素体积经过公式（1）计算后得到以 μm^3 为单位的实际体积，见公式（1）所示：

$$V = N \frac{\Delta}{n_g} \Delta_D^2 \quad (1)$$

式中：

V ——缺陷体积，单位为立方微米（ μm^3 ）；

N ——缺陷像素体积，单位为像素（Pixel）；

Δ ——为测量系统在空气中的轴向分辨率，单位为微米（ μm ）；

Δ_D ——为测量系统的横向分辨率，单位为微米（ μm ）；

n_g ——为被测样品的群折射率。

8.5 亚表面缺陷横向面积计算

将亚表面缺陷的横向面积经过公式（2）计算后得到以 μm^2 为单位的实际面积，见公式（2）所示：

$$S = N \Delta_D^2 \quad (2)$$

式中：

S ——缺陷面积，单位为平方微米（ μm^2 ）；

N ——缺陷在 XY 平面的投影像素面积，单位为像素（Pixel）；

Δ_D ——为测量系统的横向分辨率，单位为微米（ μm ）。

8.6 亚表面缺陷深度尺寸计算

将亚表面缺陷的深度尺寸经过公式（3）计算后得到以 μm 为单位的实际长度，见公式（3）所示：

$$L = (Z_{\max} - Z_{\min} + 1) \frac{\Delta}{n_g} \quad (3)$$

式中：

- L ——缺陷深度尺寸，单位为微米（ μm ）；
 $Z_{\max}$ ——离光学镜片表面最深缺陷像素位置，单位为像素（Pixel）；
 $Z_{\min}$ ——离光学镜片表面最浅缺陷像素位置，单位为像素（Pixel）；
 Δ ——为测量系统在空气中的轴向分辨率，单位为微米（ μm ）；
 n_g ——为被测样品的群折射率。

8.7 亚表面缺陷深度位置计算

将亚表面缺陷的深度位置经过公式（4）计算后得到以 μm 为单位的实际长度，见公式（4）所示：

$$D = \frac{(Z_{\max} + Z_{\min})}{2} \frac{\Delta}{n_g} \dots\dots\dots (4)$$

式中：

- D ——缺陷深度位置，单位为微米（ μm ）；
 $Z_{\max}$ ——离光学镜片表面最深缺陷像素位置，单位为像素（Pixel）；
 $Z_{\min}$ ——离光学镜片表面最浅缺陷像素位置，单位为像素（Pixel）；
 Δ ——为测量系统在空气中的轴向分辨率，单位为微米（ μm ）；
 n_g ——为被测样品的群折射率。

9 测量报告

测量报告至少包含下列信息：

- 设备型号、精度、校验情况
- 样品名称、材料、折射率、群折射率等参数信息；
- 是否进行有效性判定；
- 按测量区域，逐个给出亚表面缺陷个数以及每个亚表面缺陷的亚表面缺陷体积、亚表面缺陷横向面积、亚表面缺陷深度尺寸、亚表面缺陷深度位置。

附录 A

(资料性)

光学玻璃材料群折射率换算

若光学玻璃的群折射率未知，可根据玻璃材料目录查找（常见无色光学玻璃材料见GB/T 903-2019附录B）折射率色散公式参数。按柯西色散公式计算获得玻璃材料在测量系统工作波段内的折射率曲线。柯西色散公式见公式（A.1）：

$$n_{(\lambda)} = a + \frac{b}{\lambda^2} + \frac{c}{\lambda^4} \dots\dots\dots (A.1)$$

式中：

$n_{(\lambda)}$ ——介质在系统工作波段范围内的折射率曲线。

a 、 b 、 c ——柯西色散系数，可由玻璃目录中已知介质的三个折射率求出；

λ ——系统工作波段范围内的波长，单位为微米（ μm ）

根据得到的折射率曲线，按群折射率和折射率公式计算得到。群折射率和折射率公式见公式（A.2）：

$$n_{g(k)} = k \frac{\partial n_{(k)}}{\partial k} + n_{(k)} \dots\dots\dots (A.2)$$

式中：

k ——表示波数，是波长的倒数；

$n_{g(k)}$ ——介质在系统工作波段范围内随波数变化的群折射率曲线；

∂ ——偏微分求导符号。

材料的群折射率取值可近似为中心波长的群折射率值。