

光学元件表面疵病标准板系统设计

刘旭¹ 任寰¹ 柴立群¹ 陈波¹ 杨甬英² 高鑫²

(¹中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)
(²浙江大学现代光学仪器国家重点实验室, 浙江 杭州 310027)

摘要 为解决大口径光学元件表面疵病检测设备的精确测量、校准和溯源问题。设计了用于标定表面疵病检测系统的标准板,通过电子束曝光将定标图案转移至掩模板,再采用反应离子束刻蚀的方法制作标准板。通过扫描电镜测量标准板上各标准线的真实线宽尺寸,并以扫描电镜测量结果为参考值标定大口径表面疵病检测系统。利用所设计标准板标定基于散射成像法的大口径表面疵病检测系统。结果表明,当疵病线宽尺寸大于 $45\ \mu\text{m}$ 时,疵病的散射像满足几何成像原理,当疵病宽度尺寸小于 $45\ \mu\text{m}$ 时,需按标定结果进行计算。

关键词 光学设计;表面疵病;标准板;反应离子束;大口径光学元件;高功率激光驱动器

中图分类号 TN247 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.s116005

Calibration Plate Design for Surface Defect Inspecting System

Liu Xu¹ Reb Huan¹ Chai Liqun¹ Chen Bo¹ Yang Yongying² Gao Xin²

(¹Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China)
(²State Key Laboratory of Modern Optical Instrument, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China)

Abstract A reference plate is designed to calibrate surface defects inspecting system. By using it, the defects inspecting system can detect surface defects accurately. The main uncertainty which would affect the system's measuring accuracy is analyzed to find out the way of reducing it. Electron beam is used to transfer all the design chart to mask plate, and the calibrate plate is produced by using the reactive ion beam etching. Every standard scratch's actual dimension is measured by scanning electron microscope, and the measured dimension is used to calibrate the surface defects inspecting system. Experiments are performed to calibrate the surface defect inspecting system for large aperture optical components. The result shows that the scattering image is meet to geometrical image result when the dimension of scratch is greater than $45\ \mu\text{m}$, while it should be computed by calibrated results as the dimension of scratch is less than $45\ \mu\text{m}$.

Key words optical design; surface defects inspecting; calibrate plate; reactive ion beam etching; large aperture optical components; high power laser system

OCIS codes

1 引言

表面疵病是高功率激光装置用的大口径光学元件的重要技术指标,也是高功率激光装置负载能力的重要体现。对强光光学元件而言,即使是微米、亚微米量级的表面疵病都将对整个系统运行的性能造成严重影响,因此疵病的研究和检验将成为精密表面元件质量控制工作中的重要组成部分。探测微米量级的表面疵病有各种光学方法,如成像法、散射能量分析法等都是通过对表面疵病成像或散射光能量的大小及角度分布情况进行分析来评价精密光学元

件表面的疵病状况^[1~8]。不管利用什么探测方法,都需要一个客观定量的数字化评价标准。

在目前的大口径光学元件表面疵病检测系统中^[9,10],采用了在透射玻璃基底上刻划透明的划痕或麻点的标准板来实现定标。这一方法主要是考虑到在定标的过程中,标准板上刻划的透明划痕或麻点与光学元件在抛光过程中抛光颗粒在表面产生的疵病具有一致性。在多次大口径表面疵病检测过程分析发现,采用标准板定标检测系统后,在同样的定标环境及过程中对疵病的数字化评价具有更精确或

收稿日期: 2012-02-22; 收到修改稿日期: 2012-05-04

作者简介: 刘旭(1983—),男,硕士,主要从事精密光学检测技术方面的研究。E-mail: zjuliuxu@gmail.com

接近的结果。而如果在玻璃上使用了不透明材料如镀铬形成人工物作为标准比对,则其反射和散射的能量与元件表面的情况是不一致的,对定标的精度有影响。因此急需建立一套强光光学表面疵病计量标准板系统,为高功率激光驱动器实现光学元件表面疵病快速数字化精确检测提供量值溯源依据。

本文通过建立大口径光学元件表面疵病的标准板系统,解决了大口径光学元件表面疵病的精确测量、校准和溯源问题,并实现了此参数量值的统一。

2 设计原理

为使标准板的定标图案能够尽可能全面地模拟光学表面的实际疵病,设计中主要考虑要能够在标准板上观察到不同形态、不同尺寸、不同方向的各种疵病的成像特征,定标图案要具有尽可能广泛的代表性。另一方面,为了便于在实验中对标准板的方向进行校正以及视场的测量,应当在适当位置设置长定位线;为了便于在实验中对当前观察到的定标图案进行定位,应当在特征位置的定标图案旁标注疵病编号。图1是标准板定标线设计图、区域标识及局部放大图。为使标准板的定标图案尽可能全面地模拟真实疵病,以及便于在实验中对标准板进行定位,主要设计了以下几类标准图形。

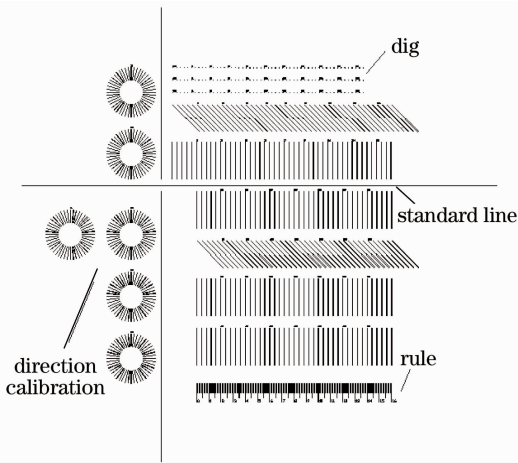


图1 标准板定标线设计图、区域标识及局部放大图
Fig.1 Design, region labelling and partial enlarged charts of calibration plate

1) 麻点:设计了直径在 $0.5 \sim 40.0 \mu\text{m}$ 范围内逐渐递增的圆点,用以观察不同面积的麻点的成像特征;

2) 定标划痕线:宽度在 $0.5 \sim 40.0 \mu\text{m}$ 或更大范围内逐渐递增的竖线和同样变化规律的 45° 斜线,用以观察两种角度的不同尺寸刻痕的成像特征

并对刻痕疵病尺寸进行定标;

3) 长划痕线:长度大于 20 mm ,用于定位标准板测量视场,并作为校正 CCD 坐标与移导系统坐标一致性标定的标准线;

4) 辐射型刻痕:48 条间隔 7.5° 的刻痕围绕成太阳形,用以观察同宽度、不同方向刻痕的成像特征;

5) 标尺:单位间隔 0.1 mm ,总长 16 mm 的标尺,用于测量显微镜视场大小,同时可用于标定 CCD 的空间分辨率。

对于宽度从小到大渐变的刻痕,其宽度间隔由密至疏变化,以便尽可能多地获得不同宽度刻痕的成像特征。

另外,为了定标时方便定位,对于特征位置的定标线进行了疵病编号。编号的含义包括疵病位置和疵病尺寸,使得在标记位置的同时也便于对实验中观察到的疵病宽度进行判断。

3 标准板的制作

考虑到标准板需要多次使用,且使用时容易造成工作表面划伤,因此使用具有硬度高、耐磨性好等优点的熔石英制作标准板。

选用镀有铬膜的进口标准石英掩模基板[直径 5 inch ($1 \text{ inch} = 2.54 \text{ cm}$)、厚度 2.35 mm]制作掩模板,采用电子束曝光的方法,将定标图案转移到掩模板的铬膜上。这种方法刻制的定标线的最小线宽可达微米和亚微米量级,制造精度可达 $0.2 \mu\text{m}$ 以上。

掩模板制作完成后,有以下三种可选的后续加工方法,本文主要采用了第2种方法。

1) 接近式光刻:使用这种工艺加工标准板时,只需制作一块掩模板就可多次使用来制作标准板。然而,由于这种工艺引入衍射效应,其最大分辨率仅为 $2 \sim 4 \mu\text{m}$,无法加工出所要求的亚微米量级的条纹。同时,由于不同线条宽度需要的曝光参数有所不同,而我们的标准板要求的线宽是从细到宽渐变的,因此加工时不宜控制曝光参数,导致加工精度降低。另一方面,光刻法制作刻线需要对基板进行湿法刻蚀,即化学腐蚀,属各向同性的刻蚀,得到的刻线边缘多是圆弧形,精度低。腐蚀后条纹宽度还会有一定的扩展,因此设计时应留有一定的余量,然而余量的多少较难把握。

2) 反应离子束刻蚀(RIBE)法:流程如图2所示,是目前首选的方法,即以铬膜为保护层,将定标图形转移至石英基底上,然后去除无图样处的铬膜,

即可得到具有标准刻痕、麻点等图形的标准板。这种方法省去了光刻的步骤,而且加工一块掩模板后,可分成4块标准板。另外,RIBE属于干法刻蚀,具

有各向异性好、刻蚀速率适当、片内均匀性好等优点,满足对加工微米及亚微米量级条纹的需求。其缺点在于板厚只能是标准尺寸,比较薄,不能自行设计。

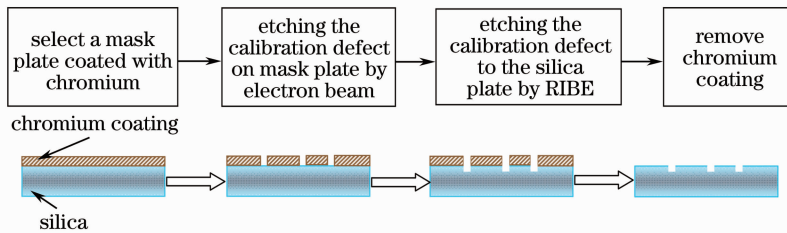


图2 反应离子束刻蚀法制作标准板流程

Fig. 2 Procedure of making calibration plate by RIBE

3) 掩模板直接作为标准板使用:这种标准板的优点在于,在低放大倍率下,其定标线的成像亮度比较适中,不会饱和,因此在低放大倍率下,对成像亮度相对较高的细线的定标会比第2种方法制作的标准板准确,且省去了刻蚀的步骤,成本有所降低。其缺点是:其表面铬膜的强度不如石英板强度高,长期使用可能导致铬膜磨损,不耐用,甚至日常使用中清洁擦拭过程都需十分仔细,需要用特殊溶剂和长纤维材料的擦镜布才能进行擦拭,且可擦次数较为有限。另一方面,与石英表面相比铬膜表面更不易清洁,这是由于它硬度低,表面粗糙度较高,不仅较易损伤和残留脏东西,并且很难擦净,又因为损伤和污渍都会反映为亮斑,所以当这些损伤和亮斑与定标线的距离较近时或者面积较大时,就可能会在图像处理的过程中与定标线粘连在一起,造成定标线宽度的误判,影响定标的准确度。另外,由于其表面与真实测量中的实际光学元件的表面材料不同,因此可能导致实际尺寸与像素尺寸的比对关系不一致,导致定标不准。因此这一种方法还需要进一步论证

和探讨。

4 标准板的检测与溯源

由于标准板的制作工艺的精度限制,定标图案的设计尺寸和加工得到的实际尺寸可能存在误差,因此需要采用更精确的方法对定标线进行测试以确定其标称宽度,即标准板的检测及溯源途径。要得到精确的亚微米量级的线宽,可利用扫描电镜(SEM)来实现。通过SEM对经过抽样的标准板的定标线进行测量来检验加工精度并定义定标图案的标称尺寸。图3为标准样板在光学元件表面疵病检测系统中实测图形及其中一条 $0.5\ \mu\text{m}$ 疵病在SEM下的标定结果。对不同宽度的定标线利用SEM进行测量得到测量值,将测量值与理论值比较可以得到定标线的绝对误差。但是在后续的实际测量中,对定标线的标定应该以SEM得到测量值来实施标定。目前用上述工艺方法可以使定标线的绝对误差控制在亚微米量级。

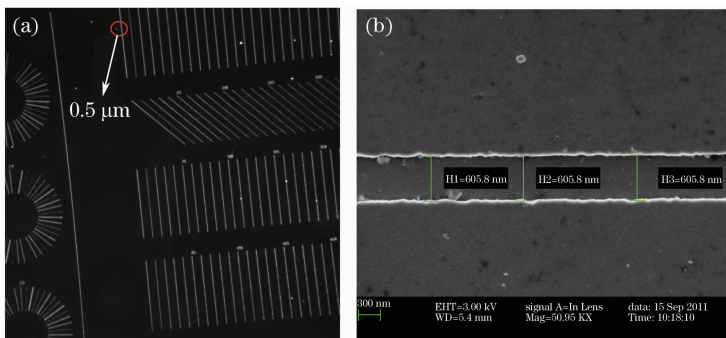


图3 标准板实物图及扫描电镜标定结果。(a)标准板在检测系统中的实测图;(b) SEM对 $0.5\ \mu\text{m}$ 疵病标定结果
Fig. 3 Image of the calibrate plate. (a) Measuring result by defect inspecting system; (b) measuring result by SEM

5 定标实验

利用所设计的标准板对神光Ⅲ主机装置所使用

的大口径表面疵病检测系统进行标定。标定结果发现,当划痕宽度大于 $45\ \mu\text{m}$ 时散射像基本满足几何

成像原理,即成像尺寸与疵病实际宽度成线性关系;当划痕宽度小于 $45\ \mu\text{m}$ 时散射成像关系不满足几何成像原理,因此,检测宽度小于 $45\ \mu\text{m}$ 的疵病需根据相应定标结果计算疵病宽度尺寸,而当疵病宽度尺寸大于 $45\ \mu\text{m}$ 时则按几何成像原理计算疵病尺寸。

利用光学元件表面疵病检测系统(如滤波、二值化)对标准板上第二组标准划痕(即图 1 中第 1 象限竖直方向的定标划痕线组)扫描成像,将扫描的子孔径图拼接成全孔径图[如图 4(a)所示],再对全孔径图进行滤波及二值化处理得到如图 4(b)所示的图

样,最后经数字图像处理得到每条划痕的成像宽度。为了真实反映被测样品的实际尺寸,按图 4 中由左至右的顺序利用 SEM 测量每条划痕的实际宽度,测试结果如表 1 所示。根据 SEM 测量结果与光学元件表面疵病检测系统的计算结果拟合出实际尺寸与成像宽度间的关系,如图 5 所示。根据拟合结果二者基本满足公式:

$$y = 0.00013081x^3 - 0.01106x^2 + 0.34675x + 7.5974, \quad (1)$$

式中 y 表示成像宽度,单位为 pixel; x 表示实际尺寸,单位为 μm 。

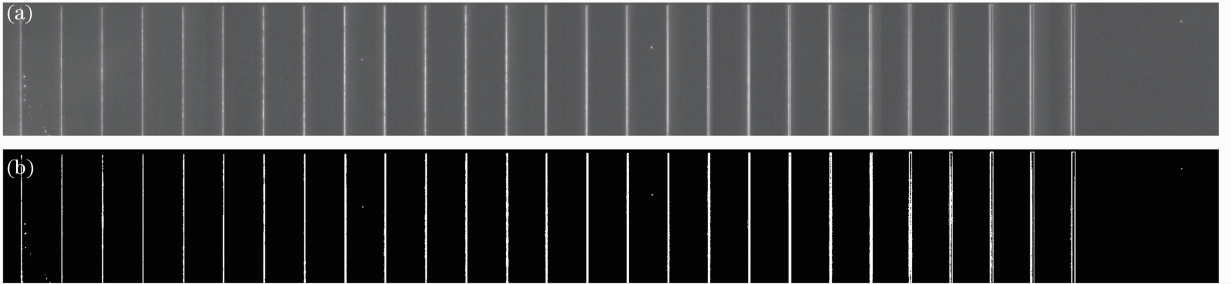


图 4 标准划痕校准结果。(a)标准划痕;(b)图像处理后的标准划痕

Fig. 4 Calibration with standard defect. (a) Standard defect; (b) processed standard defect

表 1 标准划痕在扫描电镜下测试结果

Table 1 Measuring result of standard defect by SEM

Number	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Result / μm	0.52	1.85	3.47	4.85	5.41	6.74	7.73	7.83	8.81	10.15
Number	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Result / μm	10.95	12.35	13.08	13.48	14.53	15.57	15.72	16.48	17.45	19.01
Number	21	22	23	24	25	26	27			
Result / μm	20.55	21.83	22.32	22.97	23.38	24.21	25.18			

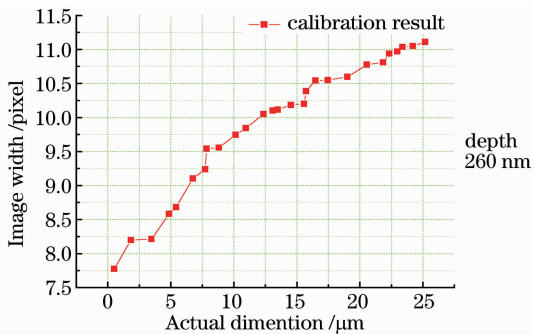


图 5 成像宽度与实际线宽的关系

Fig. 5 Relationship between image and actual dimension of defects

结果的一致性、可比性有重要意义。标准板中所设计的“辐射型刻痕”可验证系统是否能检测到任意方向的表面疵病,避免检测过程中存在漏检的情况。定标划痕线可对不同尺寸的疵病成像特征进行标定,提高检测系统的可靠性。

参 考 文 献

- 1 Dai Mingkui, Xu Deyan. The present situation of imperfections testing and researching on the optical components[J]. *Optical Instruments*, 1996, **18**(4): 32~39
- 戴名奎, 徐德衍. 光学元件的疵病检验与研究现状[J]. *光学仪器*, 1996, **18**(4): 32~39
- 2 A. Huard. Visibility method to classify microscopic surface defects for both reflection and t transmission systems[C]. *SPIE*, 1985, **525**: 36~42
- 3 L. R. Baker. Inspection of surface flaws by comparator microscopy[J]. *Appl. Opt.*, 1988, **27**(22): 4620~4625
- 4 Zhang Xiao, Yang Guoguang, Cheng Shangyi *et al.*. Laser frequency spectrum analysis method and automatic inspection instrument of optical surface imperfection[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 1994, **15**(4): 396~399

6 结 论

通过制作标准定标板,可实现基于散射法的光学元件表面疵病检测系统的校准。该标准板系统的建立对于提高不同设备、不同部门对同一元件检测

- 张 晓, 杨国光, 程上彝 等. 光学表面疵病的激光频谱分析法及其自动检测仪[J]. 仪器仪表学报, 1994, **15**(4): 396~399
- 5 Wang Fengquan, Yang Yongying, Sun Dandan. Research of digital inspection system of precise surface defect[J]. *Optical Instruments*, 2006, **28**(3): 71~75
- 汪凤全, 杨甬英, 孙丹丹. 精密表面缺陷的数字化检测系统研究[J]. 光学仪器, 2006, **28**(3): 71~75
- 6 Wang Xue, Xie Zhijiang, Sun Hongyan *et al.*. Study on automatic flaw inspection system for large caliber precision optical surface[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2006, **27**(10): 1262~1265
- 王 雪, 谢志江, 孙红岩 等. 大口径精密光学元件表面疵病检测系统研究[J]. 仪器仪表学报, 2006, **27**(10): 1262~1265
- 7 GB 1185-89. Surface defect s of optical components[S]. 1989
GB 1185289. 光学零件表面疵病[S]. 1989
- 8 Liu Xu, Yang Yongying, Liu Dong *et al.*. Error analysis of sub-aperture synthesis for detecting surface defects of optical components [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2008, **19**(8): 1088~1093
- 刘 旭, 杨甬英, 刘 东 等. 光学元件表面疵病检测扫描拼接的误差分析[J]. 光电子激光, 2008, **19**(8): 1088~1093
- 9 Cheng Xiaofeng, Xu Xu, Zhang Lin *et al.*. Defect testing of large aperture optics based on high resolution CCD camera[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2009, **21**(11): 1678~1680
- 程晓峰, 徐 旭, 张 林 等. 基于高分辨率的大口径光学元件疵病检测[J]. 强激光与粒子束, 2009, **21**(11): 1678~1680
- 10 Yang Yongying, Lu Chunhua, Liang Jiao *et al.*. Microscopic dark-field scattering imaging and digitalization evaluation system of defects on optical devices precision surface[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(6): 1031~1038
- 杨甬英, 陆春华, 梁 蛟 等. 光学元件表面缺陷的显微散射暗场成像及数字化评价系统 [J]. 光学学报, 2007, **27**(6): 1031~1038

栏目编辑:马 沂