

纳米光学表面加工缺陷高效检测技术

朱学亮 杭凌侠 田爱玲

(西安工业大学光电工程学院 陕西省薄膜技术与光学检测重点实验室, 陕西 西安 710032)

摘要 纳米光学表面是指表面粗糙度均方根值在纳米尺度的光学表面,广泛应用于微电子领域以及光学仪器和装备领域。纳米光学表面加工缺陷主要有表面损伤和亚表层损伤两个方面;基于非接触式无损检测手段的优点,针对白光干涉技术和表面散射测量技术等进行原理分析,采用不同的工艺条件制备不同加工缺陷的测试样片,分别采用白光干涉仪、原子力显微镜和表面散射测量仪进行测量对比分析,实验结果表明白光干涉技术是进行表面粗糙度和亚表层损伤测量的有效手段,具有检测精度高、测量速度快以及对被测件无损伤等特点。

关键词 测量;加工缺陷;检测;纳米表面;亚表层损伤

中图分类号 TN247 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP48.101201

Efficient Testing Technology of Optical Nanosurface Processing Defect

Zhu Xueliang Hang Lingxia Tian Ailing

(Shaanxi Province Key Laboratory of Thin Films Technology and Optical Test, Xi'an Technological University, Xi'an, Shaanxi 710032, China)

Abstract Optical nanosurface whose RMS of roughness is at the nanoscale, is widely used in microelectronics and optical instruments. Optical nanosurface processing defects mainly contain surface damage and subsurface damage. Because of the advantage of non-destructive testing, we analyze the measurement technique of surface scattering theory and white light interferometry. Then the test samples with different processing defects are prepared from different technological conditions, and are measured by three different techniques, such as white light interferometer, atomic force microscopy and surface scattering measuring instrument. Comparison of experimental results show that white light interferometry is an effective measurement means for the measurement of surface roughness and subsurface damage with high precision, high speed and no other damage during the testing.

Key words measurement; processing defect; testing; nanosurface; subsurface damage

OCIS codes 120.6660; 220.4840; 220.4241

1 引言

纳米光学表面是指表面粗糙度均方根值在纳米尺度的光学表面,广泛应用于微电子领域以及光学仪器和装备领域,如光滑的硅基片、激光核变系统聚焦元件等^[1]。纳米光学表面加工过程中形成的缺陷是表面缺陷的主要来源,表面质量与加工方法和工艺密切相关。如何消除或减小加工缺陷,提高纳米光学表面元件的综合性能是目前亟需研究和解决的问题^[2]。

纳米光学表面加工缺陷的主要评价指标有表面粗糙度、表面疵病和亚表层损伤三个方面,根据目前的检测水平,表面粗糙度可通过白光干涉仪(CCD)、原子力显微镜(AFM)等方法精确快速测量;表面疵病指在加工过程中产生的划痕、裂纹等损伤,它可通过光学显微镜、电学显微镜快速获取直观表面结果;亚表层损伤是指表面轮廓线以下存在的损伤,包括横向和纵向裂纹,对元件性能影响较大,目前都采用破坏性检测方法。如何无损快速地快速检测亚表层损伤是目前检测领域的研究热点问题之一,表面散射测量是一种有效方法。由于表面粗糙度、疵病和亚表层损伤都是影响表面散射的关键因素,因此可以采用散射测量方法来评价元件的综合性能^[3]。

收稿日期: 2011-04-08; **收到修改稿日期**: 2011-05-09; **网络出版日期**: 2011-09-25

基金项目: 陕西省教育厅自然科学专项科研计划项目(09JK487)资助课题。

作者简介: 朱学亮(1983—),男,助教,主要从事超光滑表面加工与检测技术研究。E-mail: nanometer2009@qq.com

2 纳米光学表面检测方法

在所有的加工领域,检测手段决定了零件加工精度的水平。光学元件表面质量检测一直处于光学加工领域的重要地位。表面粗糙度的检测也是由于纳米光学表面的需求而形成的。普通光学表面是以光洁度来评价抛光表面质量的,而纳米光学表面的精度已远远高于最高等级的光洁度要求,目前其检测手段已经相对比较成熟,可通过接触式或非接触式轮廓仪、原子力显微镜等仪器进行快速准确的检测,而亚表层损伤由于其处于表面以下,不易直接捕捉表面以下的损伤信息,已成为近些年来国内外光学检测领域的热点问题。目前,按照对检测样片的影响程度可分为非破坏性检测和破坏性检测两大类。

目前用于检测亚表层损伤的各种方法都有其应用的局限性,若要对一个光学元件进行亚表层情况的全面分析,就需要在检测过程中综合运用一种或多种检测方法。如何采取一种测量方法可以快速准确地获得表面粗糙度和亚表层损伤是我们的研究目标。白光干涉测量是高精度的无损检测方法,其原理如图 1 所示,光线照射到分束器上被分为两束光,其中一束光照射到待测表面,另一束光照射到参考表面。两束光线反射后形成干涉条纹,被 CCD 阵列所探测。在检测过程中,设备内部的压电陶瓷上下移动,待测表面及亚表面上每一点的干涉条纹信息对应存储在 CCD 阵列的每一个像素里。设备中宽光束干涉仪使用的是白光光源,当两束光的光程相等时,干涉达到最大强度。通过计算机数据处理,可得到待测样片的三维立体图形^[4]。

该设备最大检测深度为 $400\ \mu\text{m}$,垂直分辨率为 $0.01\ \text{nm}$,对于 20 倍的光学镜头,其横向检测范围为 $900\ \mu\text{m} \times 900\ \mu\text{m}$,横向分辨率为 $0.1\ \mu\text{m}$ 。仪器可以通过更换光学镜头进行横向检测范围扩展和横向分辨率提升。

原子力显微镜具有许多优点,不同于电子显微镜只能提供二维图像,AFM 可以提供真正的三维表面图形。同时,AFM 不需要对样品的任何特殊处理,如镀铜或碳,这种处理对样品会造成不可逆转的伤害。另外,电子显微镜需要运行在高真空条件下,AFM 在常压下甚至在液体环境下都可以良好工作,是测量表面粗糙度的理想仪器。AFM 的缺点在于受探头的影响太大,成像范围太小,速度慢。散射测量仪可以获得样品表面的综合散射参数,包含表面凹凸不平和表面以下裂纹等缺陷所产生的散射,是综合评价样品表面缺陷的理想测量手段。但其无法将各类因素造成的散射进行有效的分离,可通过表面沉积高反射银薄膜的方法,获得表面散射与亚表面损伤散射情况^[5,6]。

3 纳米光学表面缺陷评价标准

由于玻璃的连续网状结构特性,光学玻璃加工表面主要由凹凸层、裂纹层和变形层构成。纳米光学表面加工缺陷主要有表面凹凸层和亚表层损伤,分别采用表面粗糙度和亚表层裂纹深度作为判断缺陷大小的参数。

表面粗糙度是指加工后的零件表面由于切削过程中的刀痕、切削分离时的塑性变形、机床振动等原因,使被加工表面产生微小的峰谷所组成的微观几何形状特性,属于微观几何形状误差。评价粗糙度参数是根据粗糙度轮廓,并对原始轮廓用一个轮廓滤波器 λ_c 抑制掉长波成分而得到,其中重要的表面粗糙度参数有^[7]:

1) 粗糙度算术平均值 R_a 是普遍公认的最常用的粗糙度国际参数,它是轮廓偏离平均线的算术平均值,并且是在一个取样长度 l_r 内定义的;从数学意义上, R_a 是在取样长度内,轮廓偏离平均线的算术平均值。不

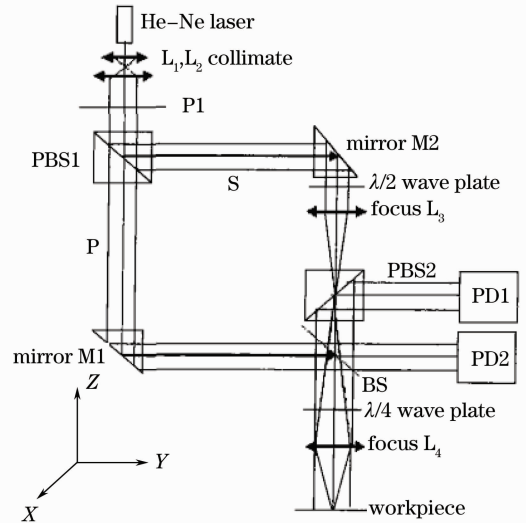


图 1 白光干涉仪检测原理

Fig. 1 Principle of white light interferometer

同特性的表面可能产生相同的 R_a 值。

2) 粗糙度最大轮廓峰高 R_p 是在取样长度内, 在平均线以上的轮廓的最大高度;

3) 粗糙度最大峰-谷高度 R_z 定义为在轮廓取样长度内的最大峰-谷高度。

在传统的研磨和抛光等工艺过程中, 在研磨期间光学元件表面在工件切削力等因素的作用下, 由于光学玻璃熔炼过程产生的应力没有消除, 原始残余应力会相对集中, 同时在元件表面及内部会产生各种裂纹, 包括径向裂纹、侧边裂纹和中心裂纹等; 再加上一些在研磨、抛光期间的杂质或水渗入裂纹中以及化学作用, 使得裂纹在外力的作用下向下延伸、加深。但是这一系列的表面损伤会被一层表面抛光重沉积层所覆盖, 裂纹层就会被隐藏, 抛光表面就产生了一层亚表层损伤层。如图 2 所示^[8], 依次为抛光层、亚表面损伤层、变形层和零缺陷层等。

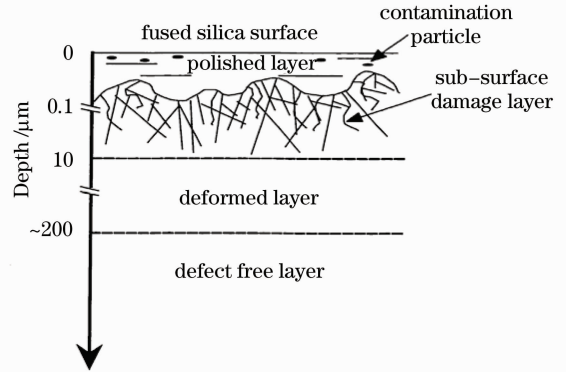


图 2 纳米光学表面理论结构

Fig. 2 Structure of optical nanosurface

评价亚表层损伤可通过裂纹的深度和损伤密度两个方面进行。裂纹深度选取表面轮廓线以下的所有裂纹的最大深度绝对值, 而损伤密度是衡量损伤裂纹数量的关键指标。当两者裂纹深度值一致, 而损伤密度差异较大时必须两者综合评价。由此可以确定纳米光学表面加工缺陷的评价参数, 即表面粗糙度和亚表层裂纹分布。根据不同的需求, 可以采用不同的参数形式进行评价。

4 测量实验与分析

4.1 实验样片制备

通过不同的工艺方法制备出不同加工缺陷的样片, 选定测量点或测量区域。实验目的是探索采用白光干涉技术进行表面粗糙度和亚表层损伤检测的可行性, 并分析检测精度和效果。针对不同加工缺陷的样片进行检测, 表面粗糙度测量采用原子力显微镜与其进行对比, 亚表层损伤检测选择散射测量仪与其进行测量对比。

实验样片材料选择石英玻璃, 规格为直径 $\phi 20$ mm、厚度 $d=4$ mm, 分别依次编号 1#, 2#, 3#, ..., 6#, 共 6 片; 为了获取表面粗糙度相同而亚表层损伤不同的差异样片, 分别通过不同的工艺方法和条件获取纳米光学表面样品, 具体的制备工艺方法如表 1 所示。其中 W40, W14 为金刚石磨料粒度, FRP 为柔性抛光方法。

表 1 制备工艺方法

Table 1 Preparation process

Workpiece	Preparation process	Surface
1#	Grinding: W40, W14 respectively 10 min; FRP: 30 min	Polishing
2#	Grinding: W40, W14 respectively 10min; FRP: 30 min	Coating
3#	Grinding: 180#, W40 10 min; class polishing: 20 min	Polishing
4#	Grinding: 180#, W40 10 min; class polishing: 20 min	Coating
5#	Grinding: W40, W14 10 min; class polishing: 20 min	Polishing
6#	Grinding: W40, W14 10 min; class polishing: 20 min	Coating

为了达到将表面散射与亚表面损伤产生的散射分离的目的, 采用了对表面进行镀制高反射薄膜的处理方法。已有的研究成果给出在抛光表面镀制金属银薄膜, 厚度为 80~100 nm 时可以较好地复现表面粗糙度, 从而可以实现镀膜前后表面粗糙度的一致。分别选取 2#, 4#, 6# 进行表面镀膜处理, 在 ZZS700 箱式真空镀膜机上利用热蒸发原理沉积银薄膜, 厚度控制在 80~100 nm^[9]。

4.2 表面粗糙度测量

通过白光干涉仪和原子力显微镜进行表面粗糙度测量, 分别对未镀膜表面和镀膜表面两类样品采用

CCI 进行检测,测量结果如表 2 和表 3 所示。通过三维立体形貌分析对比,表面沉积银薄膜后,不改变其原有的表面形貌,表面的坑点、划痕依然存在;分析数据可以知道,表面沉积薄膜后表面粗糙度相对抛光表面变小,变化量依据初始表面原有形貌而不同。

表 2 未镀膜表面 CCI 测量数据

Table 2 CCI data of polishing surface

Parameters	1 [#]	3 [#]	5 [#]
Roughness R_a /nm	1.202	5.106	1.235
0.1%~99.9% damage max deep /nm	80	350	17.827
0%~100% damage max deep / μm	0.5	1.6	1.1

表 3 镀膜表面 CCI 测量数据

Table 3 CCI data of coating surface

Parameters	2 [#]	4 [#]	6 [#]
Roughness R_a /nm	0.999	3.930	0.889
0.1%~99.9% damage max deep /nm	80	350	18
0%~100% damage max deep / μm	0.6	1.7	1.2

在 CCI 检测的基础上,针对未镀膜的抛光表面采用 AFM 进行测量,数据如表 4 所示。通过对比发现两者测量结果差异较大,但对于不同表面缺陷的样品,两者测量结果与缺陷大小趋势一致。通过对两者测量原理研究发现,CCI 的测量区域为 $0.88\text{ mm} \times 0.88\text{ mm}$,AFM 的测量区域为 $3\ \mu\text{m} \times 3\ \mu\text{m}$,这是造成两者测量差异的重要因素。通过分析软件对白光干涉仪的测量面积进行缩小,如表 4 中所示,CCI 测量范围改变后获得了与 AFM 一致的测量结果。根据仪器检测精度,其纵向分辨率达到 0.1 nm ,并且扫描和分析时间小于 3 min ,检测时间与其他表面粗糙度检测手段相比大大缩短。由此可以得出,白光干涉仪是进行表面粗糙度检测的快速而有效的仪器。

表 4 表面粗糙度测量对比数据

Table 4 Contrast data of surface roughness

Workpiece	CCI /nm	AFM /nm	Changed /nm
1 [#]	1.202	0.210	0.263
3 [#]	5.106	0.501	0.582
5 [#]	1.235	0.190	0.216

4.3 亚表层损伤测量

亚表层损伤对比测量采用散射测量方法,测量拾取点间隔 0.5 mm ,与 CCI 测量区域 $0.88\text{ mm} \times 0.88\text{ mm}$ 相对应以保证数据对比的可靠性。选择 2[#],4[#],6[#] 样片进行测量,如表 5 所示,CCI 测量数据表明 2[#] 和 6[#] 样片表面粗糙度相对一致,而亚表层损伤深度差异较大,分别为 $0.6\ \mu\text{m}$ 和 $1.2\ \mu\text{m}$ 。通过散射测量仪给出其表面总散射率分别为 0.110% 和 0.103% ,两者非常接近,即不同的亚表层损伤散射影响由于表面镀膜而被忽略,相同的表面粗糙度得到了一致的散射率。通过对比 4[#] 样品与其他两个的散射率不难发现,在测量条件完全相同的情况下,其表面粗糙度相对较大是造成散射率明显增加的重要原因。由此可以得出,白光干涉仪可以有效地测量样品亚表层损伤的大小。

表 5 散射测量比较数据

Table 5 Contrast data of scattering measurements

Workpiece	Scattering /%	R_a /nm	Damage deep / μm
2 [#]	0.110	0.999	0.6
4 [#]	0.173	2.930	1.7
6 [#]	0.103	0.889	1.2

5 结 论

基于非接触式无损检测手段的优点,针对白光干涉技术和表面散射测量技术等进行原理分析,采用不同

的工艺条件制备不同加工缺陷的石英玻璃测试样片,分别采用白光干涉仪、原子力显微镜、表面散射测量仪进行测量对比分析。通过与散射测量仪、原子力显微镜进行测量对比,实验结果表明白光干涉技术是检测表面加工缺陷的有效手段,满足纳米光学表面的加工测量精度要求,并可准确区分表面损伤和亚表层损伤,具有测量速度快,对被测件没有任何损伤等优点。

参 考 文 献

- 1 Teng Lin, Song Shaozhong. Laser ultra-high reflector substrate polishing process [J]. *Aviation Precision Manufacturing Technology*, 1997, **33**(3): 1~3
滕霖, 宋绍忠. 激光陀螺超高反射镜基片抛光工艺[J]. 航空精密制造技术, 1997, **33**(3): 1~3
- 2 Chen Yang, Chen Jianqing, Chen Zhigang. Super smooth surface polishing technology [J]. *J. Jiangsu University*, 2003, **24**(5): 55~59
陈杨, 陈建清, 陈志刚. 超光滑表面抛光技术[J]. 江苏大学学报, 2003, **24**(5): 55~59
- 3 Hang Lingxia, Zhu Xueliang, Liu Weiguo. Research of combination polishing technology [C]. *SPIE*, 2010, **7655**: 235~239
- 4 Taylor Hobson. Talysurf CCI (User's Guide) [M]. 3rd ed. London, 2004
- 5 J. C. Tsang, G. S. Oehriein, Ivan Halier. Raman spectroscopy of relative ion etching induced subsurface damage [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1985, **46**(6): 589~591
- 6 Wang Guixia. Research of Backscatter Measurement Technology [D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2008
汪贵霞. 背散射测量技术研究[D]. 西安:西安工业大学, 2008
- 7 Pang Yunxia. Research of Optical Components and Surface Damage Theory [D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2007
庞云霞. 光学元件亚表层损伤机理研究[D]. 西安:西安工业大学, 2007
- 8 F. Draheim, B. Harniseh, T. Weigel. Sub-surface damage of optical components and the influence on scattering propertiets [C]. *SPIE*, 1994, **2210**: 709~713
- 9 Pan Yongqiang, Wu Zhensen, Hang Lingxia. Influence of Ag thin films on surface roughness and light scattering of optical substrate [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(5): 1197~1199
潘永强, 吴振森, 杭凌侠. 银薄膜对光学基底表面粗糙度及光散射的影响[J]. 光子学报, 2009, **38**(5): 1197~1199
- 10 Ye Qing, Li Fuxin, Liu Yu *et al.*. Dual-wavelength optical coherence tomography system [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, **47**(4): 041701
叶青, 李福新, 刘宇等. 双波长光学相干层析成像[J]. 激光与光电子学进展, 2010, **47**(4): 041701
- 11 Yang Zhaojin, Yu Shuai, Xie Qi. Radiation metrology technology after into 21 century [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, **47**(3): 031201
杨照金, 于帅, 解琪. 迈入 21 世纪的光辐射计量测试技术[J]. 激光与光电子学进展, 2010, **47**(3): 031201
- 12 Wang Qinghua, Lu Rongsheng, Yang Lei *et al.*. Grinding surface roughness measurement based on the spatial filtering of speckle pattern texture [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(8): 2324~2328
汪庆花, 卢荣胜, 杨蕾等. 基于散斑图纹理空域滤波的磨削表面粗糙度测量[J]. 光学学报, 2010, **30**(8): 2324~2328