

doi:10.3788/gzxb20134202.0214

抛光表面的亚表层损伤检测方法研究

田爱玲, 王会婷, 党娟娟, 王春慧

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

摘要: 光学元件磨削加工引入的亚表面损伤威胁着光学元件的使用性能及寿命, 成为现阶段高能激光发展的瓶颈问题, 特别是抛光表面光学元件的亚表面损伤检测已成为光学元件制造行业的研究热点和难点. 本文结合光学共聚焦成像、层析技术、显微光学、光学散射以及微弱信号处理等技术, 给出了基于光学共聚焦层析显微成像的光学元件亚表面损伤检测方法. 分析了不同针孔大小对测量准确度的影响, 并首次给出了亚表面损伤的纵向截面分布图. 与腐蚀法比较结果显示: 针对自行加工的同一片 K9 玻璃, 采用本文提出的方法测得的亚表面损伤深度 $45\ \mu\text{m}$ 左右; 采用化学腐蚀处理技术, 对光学元件逐层刻蚀, 观察得到的亚表面损伤深度 $50\sim 55\ \mu\text{m}$. 两者基本一致, 进一步验证了本文采用的方法可以实现对光学元件亚表面损伤的定量、非破坏检测.

关键词: 抛光表面; 亚表面损伤; 共聚焦成像; 显微光学; 光学散射

中图分类号: TN247

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2013)02-0214-5

A Novel Method for Subsurface Damage Measurement of Optical Components

TIAN Ai-ling, WANG Hui-ting, DANG Juan-juan, WANG Chun-hui

(School of Photoelectric Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710032, China)

Abstract: Subsurface damages produced in grinding process will influence optical performance and lifetime of optical elements. The testing for subsurface damage of polished surface is research hot and difficult point now. Combination of confocal image, tomography technology, microscope optics, optical scatter and weak signal processing, a novel method based on laser confocal microscope tomography is proposed. The effects of different sizes of pinhole on measure accuracy are analyzed, and the cross section microstructure picture of the subsurface damage sample is given. The subsurface damage depth is about $45\ \mu\text{m}$ with this novel method. For the same K9 glass, the subsurface damage depth is about $50\sim 55\ \mu\text{m}$ with the chemical corrosion treatment technology. The measurement results are basically consistent. Comparison with the destructive etching method shows that this novel method is good for polished surface in quantitative and non-destructive.

Key words: Polished surface; Subsurface damage; Confocal image; Micro-optics; Optical scattering

0 引言

在空间技术和能源技术的需求牵引下, 空间望远镜、高能激光、惯性约束核聚变、激光陀螺和光刻镜头得到飞速发展. 这些系统都需要高准确度指标的光学元件, 即高准确度面形和超光滑表面. 超光滑表面是指表面粗糙度小于 $1\ \text{nm}$ 均方根 (Root-Mean-Square, RMS)、无亚表面损伤、无污染的表

面, 而亚表面损伤^[1-3] (Subsurface Damage, SSD) 是指研磨加工过程中在表面下产生的裂纹、残余应力以及材料本身的缺陷如气泡、杂质等. SSD 的存在影响光学元件的长期稳定性和镀膜质量, 还直接降低其使用寿命、成像质量和激光损伤阈值等重要性指标. 由于 SSD 掩盖在表面下, 复杂又隐蔽, 其检测非常困难. 因此, 如何有效评价抛光光学元件的 SSD, 成为高准确度光学元件加工中必须解决的瓶

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 51075322) 资助

第一作者: 田爱玲 (1964—), 女, 教授, 博士, 主要研究方向为光学检测、光电测试. Email: tian21964@sohu.com

通讯作者: 王会婷 (1986—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为光学检测. Email: wht0907@yahoo.com.cn

收稿日期: 2012-08-01; 录用日期: 2012-08-29

颈和热点研究问题。

目前,光学元件 SSD 检测主要分为破坏性检测和非破坏性检测。破坏性检测是部分或全部破坏试件,其优点是直观性强、易操作等,缺点是会导致光学元件的破坏或失效,这对昂贵的光学元件是极其不利的。非破坏性检测是利用物理的或其它导出的参量与材料和介质中不均匀性之间的关系,定量地估计材料的 SSD。主要方法有激光散射法、全内反射法^[1]、X 射线衍射法^[2]和表面粗糙度模型预测法^[3],这些方法都只能给出 SSD 的统计评价,不能给出 SSD 的分布和类型。近年来,国内外相关研究者做了大量的工作,出现了一些新的检测技术。本文以光学元件为对象,给出基于共焦显微成像技术检测 SSD 的方法,并与化学腐蚀法的测量结果进行了比较。

1 理论基础

1.1 测量原理

利用放置在光源后的照明针孔和探测器前的探测针孔实现点照明和点探测。光源通过照明针孔发射出的光聚焦在样品表面,聚焦点通过光学系统成像在探测针孔上,该点以外的任何发射光均被探测针孔阻挡。照明针孔与探测针孔的位置相对于被照射点来说是共轭的。沿光轴移动物体,就可得到样品深度方向的由损伤引起的光散射分布图^[4-5]。在不考虑像差的条件下,共聚焦系统是衍射受限系统,共轭针孔结构有效地抑制了非聚焦点散射光对成像的影响,从而提高了系统的分辨率和抗干扰能力。

当光线经过损伤区域时,就一定会发生散射^[6]。散射光信号强度反应了光学元件 SSD 的程度。散射强,则表明此处的损伤严重。图 1 是基于激光扫描共聚焦显微系统测量光学表面 SSD 的光路示意图。点

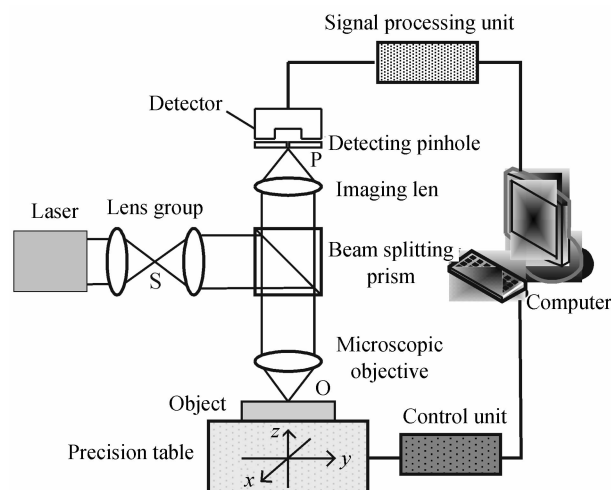


图 1 层析式共聚焦显微亚表层损伤测量系统
Fig. 1 Confocal microscope tomography surface damage measuring system

光源 S 照明物体上的一点,利用针孔 P 实现点探测,即只有来自聚焦点的光才能全部通过探测针孔,被探测器接收并成像。通过改变共焦显微镜的聚焦平面位置,对不同点进行轴向层析成像,由此获得待测元件表面下各个位置的 SSD 分布。另外,由于 SSD 极其微弱和隐蔽,而且检测时受很多因素的影响,因此需要特定的光源、探测器及信号处理模块。

SSD 检测技术的关键是测量信号的提取。因为由 SSD 引起的散射信号非常微弱,且极易被干扰信号所淹没。探测器所接收的光信号的总体描述为

$$I_T = I_{SSD} + I_{SUR} + I_B + I_X \quad (1)$$

式中: I_T 为探测器所接收到的总光强; I_{SSD} 为测试过程中由被测区域 SSD 引起的散射光强,是有用的被测信号; I_{SUR} 为被测件表面的反射光强; I_B 为环境对探测信号的干扰; I_X 为测试路径中干扰信号的影响。对于光学表面 SSD 而言,表面反射光的干扰不可忽略,环境中的干扰源 I_B 可以通过设置黑箱的方式消除。另外,从测量原理讲,测量路径上的散射 I_X 对探测信号没有影响,这里不予考虑。

1.2 针孔选择

共聚焦扫描测量采用点光源-点照明-点探测模式,探测针孔的大小直接影响系统的分辨率和信噪比。如果针孔过大,则起不到共焦点探测的作用,即降低系统的分辨率,又会引入更多的杂散光,使得系统失去层析能力。如果针孔太小,不仅会加剧实验调节的难度,而且降低了探测效率。在选择共聚焦针孔时,可以适当的减小针孔尺寸,提高系统分辨率;也可以合理的增大针孔尺寸,增大信号光强,牺牲系统的轴向分辨能力。资料显示,普遍认为选择针孔的方法是当小孔直径等于艾利斑直径时,探测效率可达 85% 以上,且满足共聚焦要求。

由于艾利斑直径在微米量级,理想情况下针孔应选择 $1 \mu\text{m}$ 甚至更小,但考虑到实际的测试系统及各种因素影响,很难准确地给出本实验测试装置对入射光的聚焦能力。因此,实验中分别采用 $5 \mu\text{m}$ 、 $10 \mu\text{m}$ 、 $15 \mu\text{m}$ 的针孔对同一个抛光表面进行纵向一维扫描。扫描从表面上 $15 \mu\text{m}$ 左右开始,经过表面到表面下 $15 \mu\text{m}$ 左右结束。图 2 为不同针孔下光信号随扫描位置的变化曲线,横坐标代表扫描位置坐标,扫描步长为 60 nm ,总扫描步数 500;纵坐标为探测光功率,单位 μW 。如果扫描光束的会聚焦点与针孔位置存在偏差时,将会影响成像质量,且容易引入轴外像差。这里采用光功率计作为探测处理模块。

比较探测光信号曲线发现:

1) 扫描开始时,由于聚焦点离光学表面远,所以,探测到的光信号比较微弱,随着扫描聚焦点位置

逐渐接近光学表面,扫描光信号逐渐增加,然后迅速增大,当扫描位置到达光学表面时,出现一个明显的极大值.随着扫描的继续,扫描的聚焦点位置慢慢远离光学表面,探测光信号先是迅速下降,然后慢慢减弱,最终又趋于平缓.

2)在光学表面位置附近扫描时,不同直径的针孔对应的探测光信号曲线的变化速率是不同的:5 μm针孔的功率变化率最大,10 μm次之,15 μm较缓和.

3)最大探测光功率随针孔直径的减小而减小.

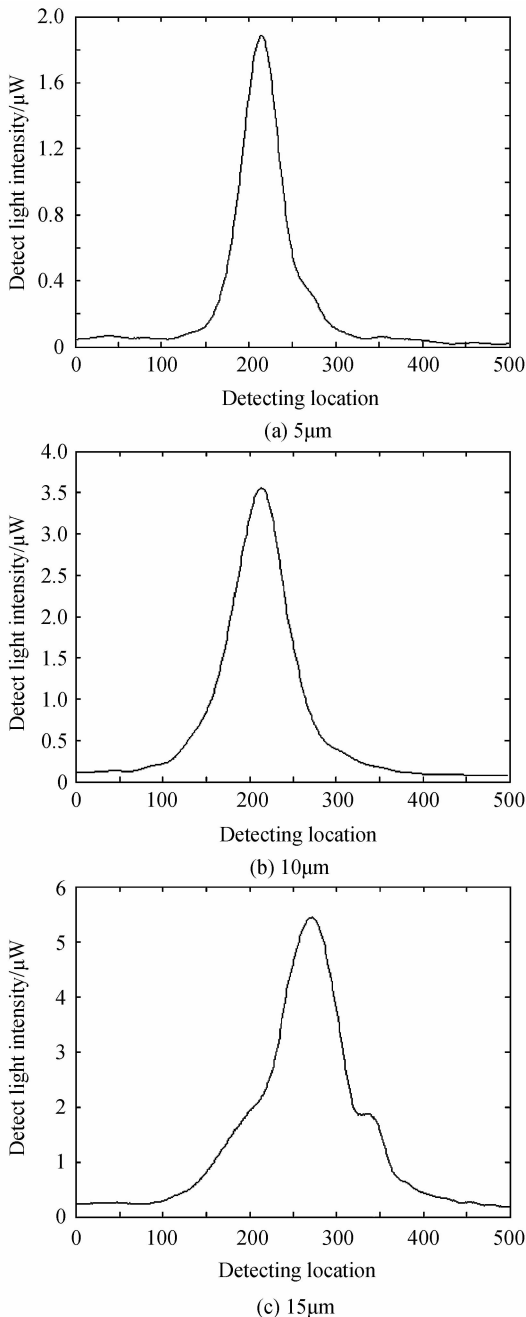


图2 不同直径探测针孔获得的一维扫描光功率曲线
Fig.2 One-dimension-scanner optical power curve of different diameter pinhole

比较测试结果,权衡考虑最大表面反射光功率

值及曲线下降速率(实际代表系统的层析分辨能力)这两大关键因素,确认选择5 μm针孔为适合于光学表面SSD共聚焦测量系统的最佳针孔尺寸.

2 实验及分析

根据本文所述原理,建立了基于共聚焦扫描的光学表面亚表层损伤测量装置,如图3.

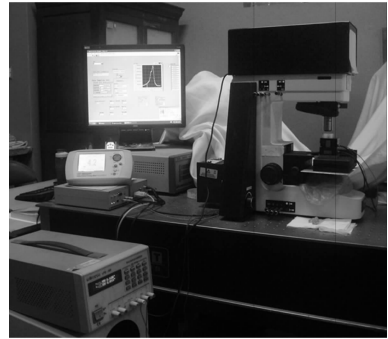


图3 实验装置
Fig.3 Experimental device

光源为激光器,针孔直径为5 μm,水平和纵向扫描均采用PI微位移传感器,探测模块采用光电探测器和电路放大系统,处理系统采用计算机进行信号处理和显示^[8].实验中使用的样品由陕西省薄膜与光学检测重点实验室加工完成,加工过程中分别采用磨料粒度为W40金刚砂粗磨15 min,W20金刚砂精磨15 min,最后抛光2 h.样品为直径15 mm厚度5 mm的K9玻璃.传统的共聚焦采用先平面再纵向的扫描,而光学表面SSD的检测主要关注纵向分布,所以采用先纵向再水平扫描的方式,如图4.

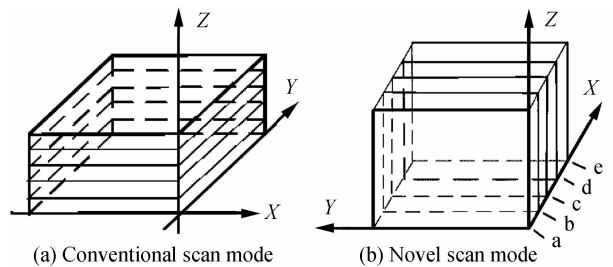


图4 共聚焦扫描方式
Fig.4 Confocal scanning mode

为消除表面反射对测量的影响,本文采用模拟和实际测量相结合的方法.通过理论分析,计算出探测器接收到的理想无SSD的元件表面反射光功率随扫描位置改变而变化的数学模型,并使用软件进行模拟得到样品表面反射光的归一化光功率理想变化曲线.测量时,将被测样品放置在载物台上,调整光学系统使聚焦物点的共轭像正好通过探测针孔,控制程序驱动PI一维扫描,水平扫描步长设定0.8 μm,总扫描步数80步,z轴扫描步长设定为1 μm,总扫描步数100步.首先,利用本实验装置测

量得到具有 SSD 信号的散射光扫描曲线,确定最大光强点,该点为表面所在位置.以该点对应的强度为起始值,将测量得到的具有 SSD 的光功率曲线与模拟出的曲线比较,从而获得无表面反射光影响的光学元件的 SSD 散射光功率扫描曲线.

对每个测量点进行上述操作,再利用图像处理的方法,可获得 SSD 的纵向截面图.图 5 是对加工的光学元件按照图 4(b)所示方式检测得到的 SSD 纵向截面,其中图 a、b、c、d 是对被测件连续扫描得到的间隔 $1\ \mu\text{m}$ 的 4 个 SSD 纵向截面图.

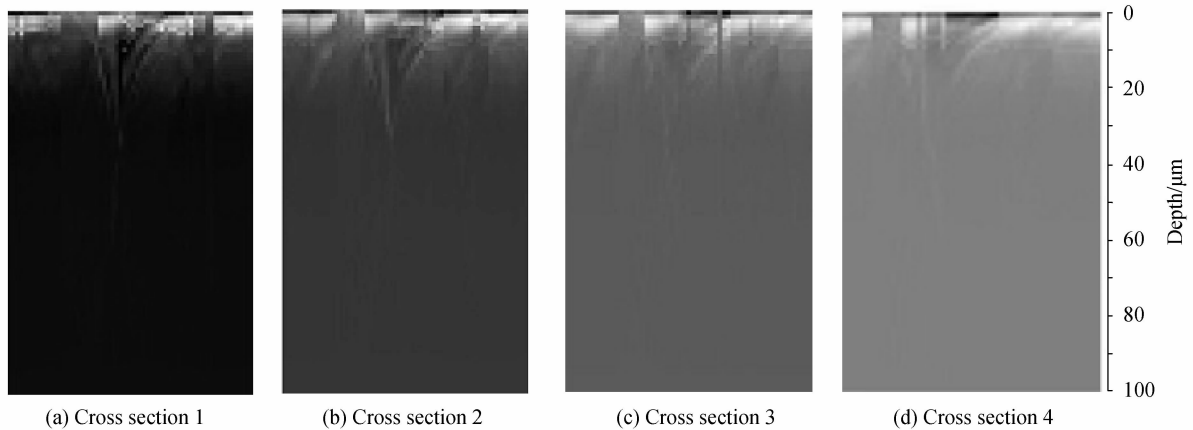


图 5 不同截面的亚表层损伤纵向分布图

Fig. 5 The different cross section microstructure picture of the subsurface damage sample

图中,纵轴是 SSD 深度,尺寸为 $100\ \mu\text{m}$. 横向为表面水平尺寸,大小为 $64\ \mu\text{m}$. 上部表面处颜色较暗,表示表面质量较好,几乎没有表面缺陷^[7]. 随深度增加,光强信号起伏明显,亮度大表示该处存在严重缺陷如裂纹大.这主要是由于加工的元件在抛光之后得到的表面质量较好,实验中对入射光的反射比较均匀,处理得到的图像上部也就会统一相对比较暗.另一方面,光学元件在加工过程中产生的 SSD 会被覆盖在看似“光滑”的抛光重积层下方.

深度进一步增加,光强信号变化越来越弱,表示损伤程度较小如裂纹小.大约在 $10\ \mu\text{m}$ 左右,光强信号变化比较明显,表示该处缺陷比较多;在 $20\ \mu\text{m}$ 左右,光强信号越来越弱,表示损伤程度比较弱;在 $45\ \mu\text{m}$ 左右光信号没有变化,表明已达到无 SSD 的基体.

另外,从图中不但可以看出断层图之间有明显的连续性,而且每张断层图的 SSD 分布具有一致性.根据扫描得到的连续变化的断层图,不仅可获得

被测件的 SSD 深度信息,还可得到 SSD 在横向的变化情况,更有利于进一步判断被测件的 SSD 信息.由于此装置扫描系统为 PI 公司的高准确度纳米定位平台,具有纳米级扫描分辨率和高重复扫描准确度,分辨率可达到 $2\ \text{nm}$.由此说明,基于共焦层析显微技术可定量检测光学元件 SSD 深度,分析损伤结构等.

3 实验验证

为了验证本方法对 SSD 检测的有效性,对相同的被测件进行腐蚀法测量.化学腐蚀方法具有直观性强、易操作等优点^[8-10],是 SSD 检测技术中最基本同时也是最有效的测量方法.配制体积比为 20% 的 HF 刻蚀溶液,温度控制在 $25\ ^\circ\text{C}$.将试件侧面与腐蚀液垂直放置,每间隔 $20\ \text{min}$ 向上提起一段距离而形成台阶,最后使用丙酮、无水乙醇和去离子水清洗试件并烘干.图 6 为使用光学显微镜在 20 倍下观测得到的 HF 腐蚀元件的不同台阶表面俯视图.

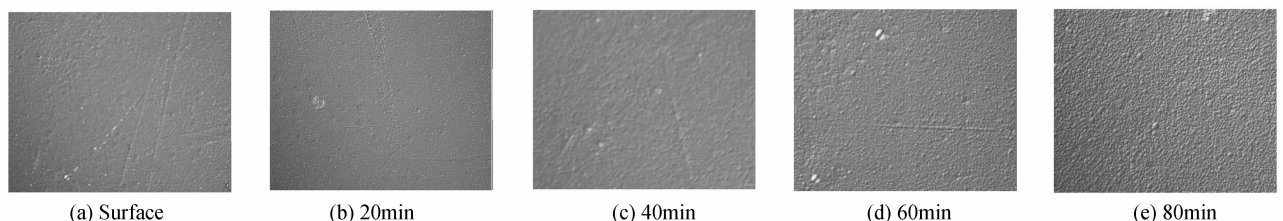


图 6 亚表层损伤不同台阶面俯视图

Fig. 6 The top view of different step surface of SSD

从图中可以看出,不同的区域表面微观结构各不相同.其中 a 为试件表面,b、c 和 d 区域是 HF 酸

腐蚀的内部区域.随着腐蚀时间的增加,表面下暴露出微小裂纹、划痕、凹凸不平的小坑等慢慢变大会又

逐渐变小、变浅,直到在 e 区域内消失.表明 e 区是没有亚表层损伤的基体.

使用 TAYLOR HOBSON 台阶仪对 HF 腐蚀后的元件测量其阶梯深度,如图 7;台阶面表示从图 7 可观察得腐蚀深度数据如表 1.

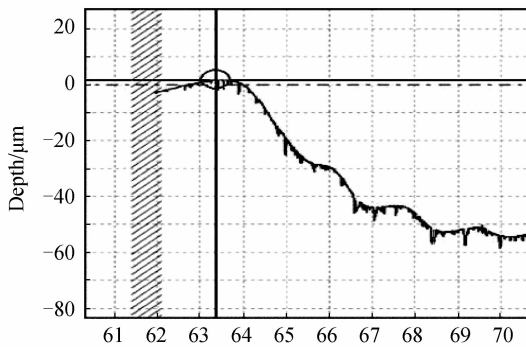


图 7 亚表层损伤深度图

Fig.7 Chart of SSD dept

表 1 不同腐蚀时间段内刻蚀深度

Eaching times/min	20	40	60	80
Etching depth/ μm	28	43	51	55

从图可以明显地看出,腐蚀初期,腐蚀深度增加很快,20 min 时,腐蚀深度大约为 28 μm ;随着腐蚀的继续,增幅逐渐减少,60 min 到 80 min 之间,腐蚀深度只增加了 4 μm ,而且腐蚀速度趋于平缓,表明基本腐蚀到基体部分.从腐蚀结果可看出,SSD 大约在 50~55 μm ,与本文的光学共焦层析显微成像方法得到的结果 45 μm 基本一致.分析存在差异的原因主要是:本文提出的方法在测量时未进行标定,测量得到的 SSD 深度是根据样品移动的范围来计算的,而实际情况下光线进入样品内部会发生折射,聚焦点位置实际与移动的距离并不相同,使测量的结果会小于理论值;另一方面,在即将腐蚀到样品基底时,最后的腐蚀时间不能精确的把握,可能会使得最终腐蚀得到的深度超过实际的损伤深度.

4 结论

本文结合共焦显微成像的基本原理,给出基于激光共焦层析技术测量光学元件的 SSD 方法,实现了非破坏性定量检测.研究了针孔对测量准确度的影响,搭建实验装置并进行调校,对自行研磨加工的样片进行测量,首次获得 SSD 的微观结构截面图,分析被测件表面不同深度范围内的损伤分布,得到的 SSD 深度大致在 45 μm 左右.同时,对相同的光

学元件采用腐蚀法进行了实验验证,可看出本文采用的方法与腐蚀法得到的损伤深度 50~55 μm 基本一致,进一步验证了本方法的可行性.

参考文献

- [1] DENG Yan, XU Qiao, CHAI Li-qun, *et al.* Total internal reflection microscopy: a subsurface defects identification technique in optically transparent components [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2009, **21**(6): 835-840.
邓燕, 许乔, 柴立群, 等. 光学元件亚表面缺陷的全内反射显微检测[J]. *强激光与粒子束*, 2009, **21**(6): 835-840.
- [2] ZHANG Yin-xia. Measurement of silicon wafer surface/subsurface damage induced by ultra-precision processing[J]. *Electronics Quality: IC and Component*, 2004, **7**: 72-75.
张银霞. 单晶硅片超精密加工表面/亚表面损伤检测技术[J]. *电子质量: 集成电路与元器件*, 2004, **7**: 72-75.
- [3] WANG Zhuo, WU Yu-lie, DAI Yi-fan, *et al.* Rapid detection of subsurface damage of optical materials in lapping process and its influence regularity [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, **16**(1): 16-21.
王卓, 吴宇列, 戴一帆, 等. 光学材料研磨亚表面损伤的快速检测及其影响规律[J]. *光学精密工程*, 2008, **16**(1): 16-21.
- [4] WANG Chun-hui, TIAN Ai-ling, WANG Hong-jun, *et al.* SSD scattering signal extraction in LSCT [J]. *Physics Procedia*, 2011, **19**: 27-35.
- [5] LI Wan-li. Preparation and research on HSOTLGP based on mie scattering theory and monte carlo method [D]. Guangzhou: Jinan University, 2008.
栗万里. 基于米散射理论和蒙特卡罗方法的新型光散射聚合物光板研制[D]. 广州: 暨南大学, 2008.
- [6] WANG Chun-hui. Study on optical sub-surface damage evaluation technology [D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2010.
王春慧. 光学表面亚表层损伤检测技术研究[D]. 西安: 西安工业大学, 2010.
- [7] DANG Juan-juan. Study on optical sub-surface damage characterization technology [D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2011.
党娟娟. 光学表面亚表层损伤表征研究[D]. 西安: 西安工业大学, 2011.
- [8] MA Bin, SHEN Zheng-xiang, ZHANG Zhong, *et al.* Fabrication and detection technique of fused silica substrate with extremely low subsurface damage[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2010, **22**(9): 2181-2185.
马彬, 沈正祥, 张众, 等. 低亚表面损伤石英光学基底的加工和检测技术[J]. *强激光与粒子束*, 2010, **22**(9): 2181-2185.
- [9] CHEN Ning, ZHANG Qing-hua, XU Qiao, *et al.* Studies on subsurface damage detection and wet etching process of K9 optics[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, **17**(9): 1289-1293.
陈宁, 张清华, 许乔, 等. K9 基片的亚表面损伤探测及化学腐蚀处理技术研究[J]. *强激光与粒子束*, 2005, **17**(9): 1289-1293.
- [10] XIANG Zhen, ZHAO Ya-zhou, HOU Jing, *et al.* Subsurface damage structure and eliminating [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(5): 1226-1230.
项震, 赵亚洲, 侯晶, 等. 减少光学元件亚表面缺陷的方法研究[J]. *光子学报*, 2009, **38**(5): 1226-1230.