

# 光学元件亚表面损伤检测技术研究现状

刘 健 马占龙 王君林

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033)

**摘要** 在传统光学加工过程中产生的亚表面损伤(SSD)会降低光学元件的使用性能和寿命,需要对其亚表面损伤进行检测从而在加工过程中加以控制。从破坏性和非破坏性检测方法两方面概括性地分析了光学元件亚表面损伤的检测技术,对各种检测方法进行了分析和讨论,并指出了各种方法的优缺点。指出了国内的亚表面损伤检测技术与国际先进水平相比存在的差距,并分析了亚表面损伤检测技术的发展趋势。

**关键词** 光学元件;亚表面损伤;破坏性检测;非破坏性检测

中图分类号 TN244 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP48.081204

## Research Status of Subsurface Damage Detection Technology of Optical Elements

Liu Jian Ma Zhanlong Wang Junlin

(State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China)

**Abstract** Subsurface damage (SSD) produced in traditional optical fabrication will reduce service performance and lifetime of optical elements. It is necessary to detect and control the subsurface damage in the fabrication process. Destructive and nondestructive detection methods of subsurface damage are analyzed. The merits and demerits of these detection methods are also discussed. The gap of subsurface damage detection technologies at home and abroad is presented, and the trend of subsurface damage detection technology is described.

**Key words** optical element; subsurface damage; destructive detection; nondestructive detection

**OCIS codes** 120.4290; 160.4670; 350.1820

## 1 引 言

随着强激光领域、光刻领域以及相关光学技术领域的发展,对光学元件的质量要求越来越高,不仅要求其具有很高的表面光滑度,还要求无亚表面损伤(SSD)。国内外学者在元件损伤机理上的大量研究表明,光学元件在加工过程中产生的亚表面损伤会直接影响材料的使用性能和寿命等重要指标,因此有效地对亚表面损伤进行检测并在加工阶段进行控制就显得尤为重要<sup>[1]</sup>。所谓光学元件亚表面损伤是指传统的接触式加工方法中不可避免地会对光学元件表面施加一定的压力,从而造成表面以下产生杂质、划痕和微裂纹等缺陷的现象。亚表面损伤一般分布在表面以下几百纳米至几百微米范围内。根据美国劳伦斯利弗莫尔实验室给出的亚表面层理论模型<sup>[2,3]</sup>,光学元件表面结构分为:1) 抛光层,深度在0.1~1 μm,主要在元件抛光阶段形成;2) 缺陷层,深度在1~100 μm,主要在元件研磨加工阶段形成;3) 变形层,深度在100~200 μm,主要在元件成型阶段形成;4) 光学材料本体。本文将对现有亚表面损伤检测技术从破坏性检测方法和非破坏性检测方法两方面进行阐述和分析,并对亚表面损伤检测技术的发展趋势进行展望。

收稿日期: 2011-03-21; 收到修改稿日期: 2011-05-05; 网络出版日期: 2011-07-21

基金项目: 国家科技重大专项项目(2009ZX02205)资助课题。

作者简介: 刘 健(1983—),男,硕士,研究实习员,主要从事超光滑表面加工工艺方面的研究。

E-mail: email: oliujian@126.com

## 2 破坏性检测技术

破坏性检测技术是检测亚表面损伤最为直接、有效及基本的一类方法。这类方法是通过部分或全部破坏被检测样品,使样品的损伤得以体现,再根据具体条件计算所要的测量结果。虽然此类方法具有破坏被检测样品的不足,但在光学元件质量控制的研究过程中仍是一种不可替代的检测手段。针对如图 1 所示的光学元件亚表面损伤结构,目前常用的破坏性的检测方法有化学蚀刻法、截面显微法、角度抛光法和磁流变抛光法等。各种方法呈现损伤的方式如表 1 所述。

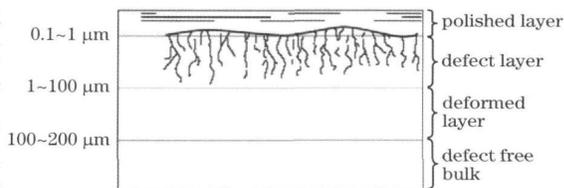


图 1 光学元件亚表面损伤结构

Fig. 1 Schematic of SSD (defect layer) in optical elements

表 1 亚表面损伤的破坏性检测方法

Table 1 Destructive detection methods of SSD

Detection method	Method to reveal damage
Chemical etching method	Chemical etching sample
Side-testing method	Polishing sample surface
Taper polishing method	Polishing sample at edge
Magnetorheological finishing (MRF) method	Polishing sample by MRF

### 2.1 化学蚀刻法

化学蚀刻法<sup>[47]</sup>是一种应用较为广泛的亚表面损伤检测方法,可用于 K9 玻璃、熔石英及单晶硅等光学材料亚表面损伤的检测。该方法利用氢氟酸等化学溶液与光学材料的化学反应,通过逐层蚀刻及相应蚀刻速率的变化获得蚀刻台阶,然后利用原子力显微镜、表面轮廓仪等观察不同深度下亚表面损伤层的形貌,进而得到亚表面损伤的深度。化学蚀刻法具有操作简便、成本低、直观性强等优点,是一种有效的亚表面损伤测量方法。但是该方法精度不高,受外界因素影响多,并且腐蚀过程不容易控制,因此测量误差可能比较大。

### 2.2 截面显微法

截面显微法是一种获取亚表面损伤最直接的方法,多用于光学元件磨削阶段亚表面损伤的定性及定量检测。所谓截面显微法<sup>[8,9]</sup>就是在垂直于精磨表面的抛光面上借助光学显微镜对样品的磨削表面进行检测,从而得到亚表面微裂纹构形以及亚表面损伤深度。截面显微法的样品制作有如图 2 所示的两种方式。为了能够准确地得到被测件的亚表面损伤,样品制作过程中要保护好磨削表面的裂纹以及抛光面与磨削面相交的棱。截面显微法检测亚表面损伤,其样品制备简单,容易实现,但精确度不高,对损伤较小的样品检测很困难。

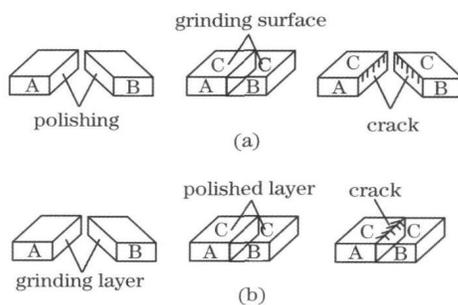


图 2 截面显微法样品制作

Fig. 2 Sample preparing methods for side-testing

### 2.3 角度抛光法

角度抛光是检测光学材料以及半导体晶体材料亚表面损伤层深度最常用的一种方法。鉴于该方法的重要性,美国材料与实验协会 (ASTM) 于 1998 年将角度抛光法标准化,标准号为 ASTM 950-98<sup>[10]</sup>。如图 3 所示,角度抛光的原理是先将样品截面上的亚表面损伤用一个小角度  $\alpha$  的斜面放大显示出来,然后通过光学显微镜检测出斜面上的裂纹区域尺寸  $M$ ,最后得到亚表面损伤深度  $D = M \times \sin \alpha$ 。

该方法可用于微米级及亚微米级损伤的检测,样品制作简单、容易实现。但该方法的缺点是角度抛光时会产生附加亚表面损伤,而且只能对特定区域进行检测,另外斜面角度  $\alpha$  的准确测量比较困难<sup>[11]</sup>。

### 2.4 磁流变抛光斑点法

磁流变抛光斑点法是在磁流变抛光技术不会对样品产生附加损伤的基础上提出的一种亚表面损伤检测方法<sup>[1216]</sup>。该方法具有比角度抛光法更好的损伤深度放大作用,因此更适合于研磨抛光阶段低亚表面损伤

的精确测量。磁流变抛光斑点法的测量过程如图 4 所示。首先, 利用磁流变抛光技术在工件表面抛光从而将亚表面损伤特征呈现出来; 然后, 利用化学溶液处理工件表面将裂纹展开; 最后, 利用轮廓仪和显微镜分别检测抛光斑点轮廓及观测不同深度的亚表面损伤特征, 从而得到亚表面损伤的深度值。相对于其他几种破坏性检测方法, 该方法较为精确而且可以呈现出完整的损伤特征。

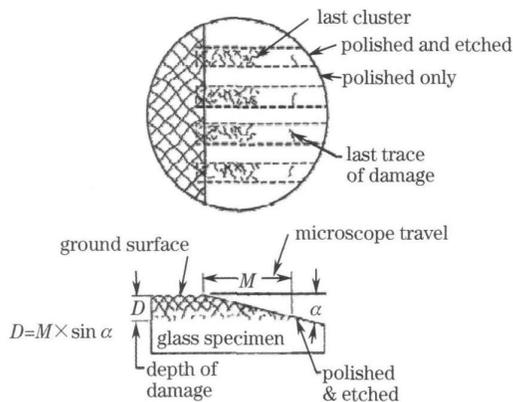


图 3 角度抛光法示意图

Fig. 3 Schematic of edge polishing

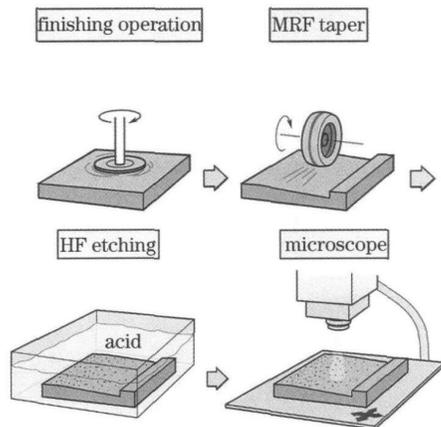


图 4 磁流变抛光法示意图

Fig. 4 Schematic of MRF method

### 3 非破坏性检测技术

破坏性检测方法对于光学元件亚表面损伤的分析起到了非常重要的作用, 但是这些方法除了对样品造成破坏外, 还存在耗时和对经验的依赖性很强等缺点。另外, 这些方法大多只能对局部区域进行检测, 而且会引入附加的亚表面损伤。相比而言, 非破坏性检测方法逐渐显现出其众多的优越性, 近年来被广泛用于材料缺陷的评价。非破坏性检测方法的基本原理是利用非破坏性的方法来得到物理的或其他导出的参数与材料和介质中不均匀性之间的关系, 并据此来定量地估计材料的亚表面结构。对于表面完整性的非接触式评价技术的研究, 已经开发出多种采用不同物理原理的无损检测方法, 主要包括基于声学技术、光学技术、热像技术等的多种检测技术。目前用于检测亚表面损伤的无损检测技术主要有激光调制散射(LMS)技术、全内反射检测(TIRM)技术、光学相干层析(OCT)技术、高频扫描声学显微(HFSAM)技术、共焦激光扫描显微(CLSM)技术等, 几种检测技术的基本原理如表 2 所示。

表 2 亚表面损伤的非破坏性检测方法

Table 2 Nondestructive detection methods of SSD

Detection method	Principle
Laser modulated scattering	Photothermal microscopy
Total internal reflection microscopy	Polarization light scattering technology
Optical coherent tomography	Optical coherence tomography
High-frequency scanning acoustic microscopy	Acoustic microscopy
Confocal laser scanning microscopy	Confocal technology and image processing technology

#### 3.1 激光调制散射技术

LMS 技术被用于高功率激光领域中的缺陷检测及光学材料特性检测, 是一种对散射信号十分敏感的光热显微技术, 美国劳伦斯利弗莫尔国家实验室在这方面开展了较多的研究<sup>[17, 18]</sup>。LMS 技术的基本原理如下: 对于一个典型的光学显微镜, 缺陷的直流(DC)散射信号如图 5(a)所示; 如图 5(b)所示, 当用一束抽运激光照射到光学元件上时, 由于光学元件及缺陷对激光的吸收导致周围区域温度的升高, 因而产生了探测光束散射场的改变等现象<sup>[19]</sup>。这种现象形成了对抽运激光束的幅度调制, 从而得到了调制散射场。对于非常光滑的表面, 其调制散射信号可以忽略不计, 因此调制散射信号主要来源于样品的缺陷。通过对散射信号的提取及处理, 可以得到整个样品的缺陷信息。该技术通过同时检测光学表面的 DC 和交流(AC)散射信号, 然

后经过对比 DC 和 AC 散射信号, 还能将对光有吸收作用的缺陷与无吸收作用的缺陷区分出来。LMS 技术是一种精度较高的非破坏性检测技术, 可以检测亚微米级别的微小缺陷, 但是需要更为精确的数学模型来实现缺陷的定量检测<sup>[17]</sup>。

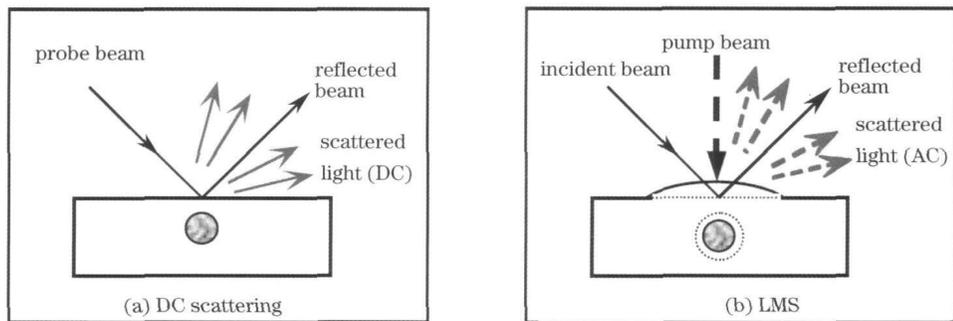


图 5 激光调制散射检测缺陷

Fig. 5 Illustration of the principle of LMS

### 3.2 全内反射显微技术

TIRM 技术是基于光的全内反射原理, 对元件表面及亚表面的缺陷散射点显微暗场成像观察以检测亚表面缺陷的一种方法。该方法由 Temple<sup>[20]</sup> 于 20 世纪 80 年代提出, 美国劳伦斯利弗莫尔国家实验室在这方面开展了大量研究<sup>[21]</sup>, 其原理如图 6 所示。被检测件放置在一块与其折射率相同的棱镜上。一束准直激光经过偏振器后以等于或大于临界角的角度经棱镜照射被检测光学元件, 显微镜位于被检测样品上方对其进行观察。入射光偏振态不同及入射角度不同会影响元件表面以下不同深度处驻波形式照明强度的分布, 对于可见度发生明显改变的微小缺陷点能衡量出其一定的深度范围; 利用显微镜精密调焦对界面下一定深度处缺陷成像, 可知缺陷点的位置深度<sup>[22, 23]</sup>。目前对于 TIRM 技术检测亚表面损伤的研究及实验主要集中于对平面光学元件的检测, 另外, 由于受光学显微镜分辨力的限制, 该方法的纵向分辨力不超过 20 mm。

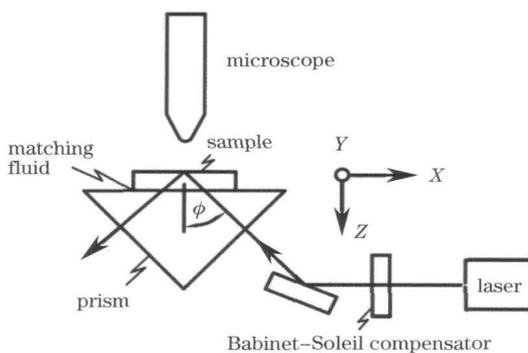


图 6 TIRM 检测原理图

Fig. 6 Schematic of TIRM detection

### 3.3 光学相干层析技术

OCT 技术是 20 世纪 90 年代继共焦扫描显微镜之后发展起来的新型光学成像技术。该技术利用弱相干干涉仪的基本原理, 检测被测物不同深度层面对入射弱相干光的背向散射信号, 通过扫描得到样品内部二维或三维结构图像。目前, OCT 技术在工程陶瓷等材料的亚表面损伤检测中已得到广泛应用<sup>[24, 25]</sup>。

其原理如图 7 所示, 核心是迈克尔孙干涉仪<sup>[26]</sup>。从图中可以看出, 经平面镜返回的参考光与经探测臂返回的来自样品不同深度的背反射光在  $2 \times 1$  耦合器相遇, 发生干涉叠加, 叠加后的光场被探测器获取。通过采集卡采集信号输入计算机, 获得扫描点的干涉强度信息。所得信息经过软件处理后即可得到 OCT 图像及样品的缺陷信息。由于光源的弱相干性, 利用该方法可以选择性地检测与其光程相匹配的来自样品不同层面的反射光。通过振镜沿样品横向及纵向的二维扫描, 得到被测样品不同深度处的反射信号信息。对于工程陶瓷的检测, OCT 技术探测深度可以达到  $500 \mu\text{m}$ , 其横向和深度方向的分辨力分别为  $4 \mu\text{m}$  和  $10 \mu\text{m}$ <sup>[25]</sup>。

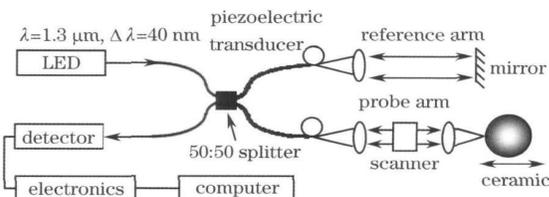


图 7 光学相干层析检测原理图

Fig. 7 Schematic of OCT detection

### 3.4 高频扫描声学显微技术

HFSAM 技术利用超声波的穿透特性来得到材料的亚表面损伤图像信息。HFSAM 技术可用于磨削等加工引入的亚表面损伤缺陷的非破坏性探测。HFSAM 技术主要包括 5 个部分<sup>[27]</sup>: 声探针, 混频器, 信号传输和接收模块, 机械调整机构, 计算机控制及数据处理模块。

图 8 为利用声探针对于样品进行探测的示意图。射频 (RF) 信号通过压电换能器传输到蓝宝石棒中, 同时利用压电换能器检测返回到蓝宝石棒上表面的超声波。蓝宝石棒浸没在蒸馏水耦合液中, 其下端的凹面对入射的声波起汇聚作用。蓝宝石棒凹面的几何形状决定了入射声波的性质与探测深度。通过在  $X$ - $Y$  平面内对样品进行扫描来得到样品亚表面的 HFSAM 图像。将焦平面调节到样品的不同深度位置, 最终得到样品的亚表面缺陷信息。该 HFSAM 技术的工作频率范围是 400 MHz~1 GHz。当频率为 480 MHz 时, HFSAM 技术的入射深度为 6 mm, 横向分辨力为 3 mm<sup>[27]</sup>。

### 3.5 共焦激光扫描显微技术

CLSM 技术是将共焦技术和数字图像处理技术相结合产生的一种高分辨力检测技术。目前, 这种技术在工程陶瓷、集成电路以及光学元件的表面及亚表面缺陷检测中得到了广泛的应用<sup>[28, 29]</sup>。CLSM 技术利用亚表面缺陷结构对入射光的强烈散射, 以散射光信号的强度分布来反映缺陷信息。

其原理如图 9 所示, CLSM 技术利用放置在光源后的照明针孔和放置在检测器前的探测针孔实现点照明和点探测。来自光源的光通过照明针孔聚焦在样品焦平面的某个点上, 只有焦平面聚焦点发射的光成像在探测针孔上, 而其余位置发射的光均被阻挡。通过对样品焦平面  $XY$  方向的扫描, 可以得到样品焦平面处的完整图像; 通过对  $Z$  方向精密调焦然后再对样品不同焦平面进行横向扫描, 得到  $Z$  方向不同位置处的图像, 并最终得到样品的亚表面损伤信息。CLSM 技术的三维图像的横向和纵向分辨力分别可以达到 0.1 mm 和 50 nm。

## 4 结 论

确定光学元件亚表面损伤层的深度及其分布, 对优化光学加工工艺有着极其重要的作用。国外对于亚表面损伤检测技术的研究开展得较早, 无论是破坏性的检测技术还是非破坏性的检测技术都已进行了广泛的研究。光学元件亚表面损伤的检测在我国还是一个崭新的领域, 与国际水平相比还有较大差距。目前的研究主要集中在半导体基片及工程陶瓷在加工过程中出现的亚表面损伤的检测上, 相应的测量手段也主要是一些较常用的破坏性检测方法。随着光电子技术的发展, 对光学元件的表面质量会提出越来越高的要求, 这必将对亚表面损伤的检测技术提出更高的要求。亚表面损伤的检测, 特别是非破坏性的检测技术有待进一步深入地研究并向量化、更为精确化及可靠性更高的方向发展。

## 参 考 文 献

1 Zhang Wei, Zhu Jianqiang. Effect of bound diamond abrasives fabrication technology on subsurface damage in N-doped

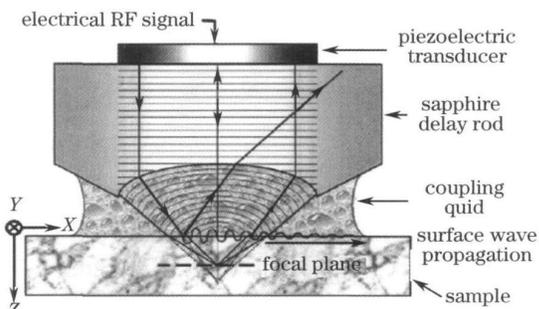


图 8 HFSAM 的声探针

Fig. 8 Configuration of acoustic probe and the specimen

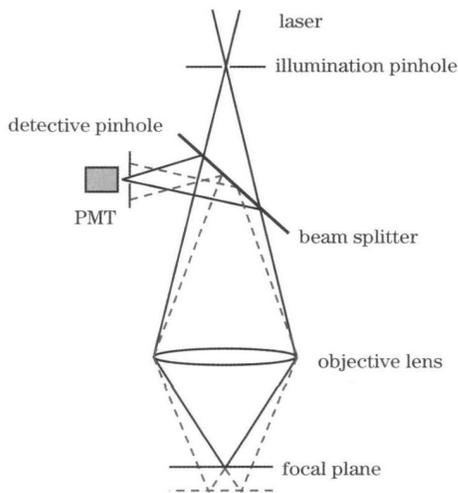


图 9 CLSM 的原理图

Fig. 9 Schematic of CLSM

- phosphate glass[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(2): 268~ 272
- 张 伟, 朱健强. 固着磨料加工工艺对磷酸盐钽玻璃亚表面缺陷的影响[J]. 中国激光, 2008, **35**(2): 268~ 272
- 2 D. W. Camp, M. R. Kozlowski, L. M. Sheehan *et al.*. Subsurface damage and polishing compound affect the 355 nm laser damage threshold of fused silica surfaces[C]. *SPIE*, 1998, **3244**: 356~ 364
- 3 Jian Shen, Shouhua Liu, Kui Yi *et al.*. Subsurface damage in optical substrates[J]. *Optik*, 2005, **116**(6): 288~ 294
- 4 Li Gailing, Wu Yulie, Wang Zhuo *et al.*. Experiment study on the destructive measurement of the depth of SSD for optical material[J]. *Aviation Precision Manufacturing Technology*, 2006, **42**(6): 19~ 22
- 李改灵, 吴宇列, 王 卓等. 光学材料亚表面损伤深度破坏性测量技术的实验研究[J]. 航空精密制造技术, 2006, **42**(6): 19~ 22
- 5 Ma Bin, Shen Zhengxiang, 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]. 强激光与离子束, 2010, **22**(9): 2181~ 2185
- 6 Zhang Wei, Zhu Jianqiang. Experimental investigation on surface/subsurface damage of Nd doped phosphate glass[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(2): 268~ 272
- 张 伟, 朱健强. 磷酸盐钽玻璃表面/亚表面损伤特性实验研究[J]. 光学学报, 2008, **28**(2): 268~ 272
- 7 J. Neauport, C. Ambard, P. Cormont. Subsurface damage measurement of ground fused silica parts by HF etching techniques [J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(22): 20448~ 20456
- 8 Feng Jingwu. Side-testing method for measuring depth of destructive layer of fineground glass surface[J]. *Optical Technique*, 1994, **20**(5): 23~ 26
- 冯景武. 测量精磨玻璃表面破坏层深度的侧面观测法[J]. 光学技术, 1994, **20**(5): 23~ 26
- 9 Wu Dongjiang, Cao Xiansuo, Wang Qiangguo *et al.*. Damage detection and analysis of machined KDP crystal subsurface [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2007, **15**(11): 1721~ 1726
- 吴东江, 曹先锁, 王强国等. KDP 晶体加工表面的亚表面损伤检测与分析[J]. 光学精密工程, 2007, **15**(11): 1721~ 1726
- 10 American Society for Testing and Materials. ASTM F950-98: Standard Test Method for Measuring the Depth of Crystal Damage of a Mechanically Worked Silicon Slice Surface by Angle Polishing and Defect Etching[S]. West Conshohocken: ASTM International, 1998
- 11 Zhang Yinxia. Measurement of silica wafer surface/subsurface damage induced by ultra-precision processing[J]. *Electronic Quality*, 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, 2004, (7): 72~ 75
- 12 P. E. Miller, T. I. Suratwala, L. L. Wong *et al.*. The distribution of subsurface damage in fused silica[C]. *SPIE*, 2005, **5991**: 599101
- 13 A. R. Joseph, C. L. John, D. J. Stephen. Subsurface damage in some single crystalline optical materials [J]. *Appl. Opt.*, 2005, **44**(12): 2241~ 2249
- 14 A. M. Joseph, J. D. Pete, A. S. William *et al.*. Utilization of magnetorheological finishing as a diagnostic tool for investigating the three-dimensional structure of fractures in fused silica[C]. *SPIE*, 2005, **5991**: 599102
- 15 Wang Zhuo, Wu Yulie, Dai Yifan *et al.*. Subsurface damage distribution in the lapping process[J]. *Appl. Opt.*, 2008, **47**(10): 1417~ 1426
- 16 Yaguo Li, Nan Zheng, Haibo Li *et al.*. Morphology and distribution of subsurface damage in optical fused silica parts: bound-abrasive grinding[J]. *Appl. Surf. Sci.*, 2011, **257**(6): 2066~ 2073
- 17 Z. L. Wu, L. Sheehan, M. R. Kozlowski. Laser modulated scattering as a nondestructive evaluation tool for defect inspection in optical materials for high power laser applications[J]. *Opt. Express*, 1998, **3**(10): 376~ 383
- 18 Z. L. Wu, M. D. Feit, Mark R. Kozlowski *et al.*. Laser modulated scattering as a nondestructive evaluation tool for optical surfaces and thin film coatings[C]. *SPIE*, 1998, **3578**: 721~ 729
- 19 Ma Xiaobo, Hu Chao, Tan Heping. Thermal wave multiple scattering by subsurface cylinders[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(12): 1707~ 1711
- 马晓波, 胡 超, 谈和平. 亚表面圆柱体对热波的多重散射问题[J]. 光学学报, 2005, **25**(12): 1707~ 1711
- 20 P. A. Temple. Total internal reflection microscopy: a surface inspection technique[J]. *Appl. Opt.*, 1981, **20**(15): 2656~ 2661
- 21 Zhi M. Liao, Simon J. Cohen, R. John *et al.*. Total internal reflection microscopy (TIRM) as a nondestructive subsurface

- damage assessment tool[C]. *SPIE*, 1995, **2428**: 43~ 53
- 22 M. S. Lynn, K. Mark, W. C. David. Application of total internal reflection microscopy for laser damage studies on fused silica [C]. *SPIE*, 1998, **3244**: 282~ 295
- 23 Deng Yan, Xu Qiao, Chai Liqun *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
- 24 M. Bashkansky, M. D. Duncan, M. Kahn *et al.*. Subsurface defect detection in ceramics by high-speed high-resolution optical coherent tomography[J]. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(1): 61~ 64
- 25 M. Bashkansky, M. D. Duncan, M. Kahn *et al.*. Subsurface defect detection in ceramic materials using low coherence optical scatter reflectometer[C]. Proceedings of a Joint Conference, 1996. 22~ 26
- 26 Zeng Nan, He Yonghong, Ma Hui *et al.*. Pearl detection with optical coherence tomography[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(8): 1140~ 1145  
曾楠, 何永红, 马辉等. 应用于珍珠检测的光学相干层析技术[J]. *中国激光*, 2007, **34**(8): 1140~ 1145
- 27 D. Rats, J. V. Stebut, F. Augereau. High frequency scanning acoustic microscopy: a novel non-destructive surface analytical tool for assessment of coating-specific elastic moduli and tomographic study of subsurface defects[J]. *Thin Solid Films*, 1999, **355-356**: 347~ 352
- 28 J. Sindel, A. Petschelt. Evaluation of subsurface damage in CAD/CAM machined dental ceramics[J]. *Mater. Sci. : Materials in Medicine*, 1998, **9**(5): 291~ 295
- 29 Kevin R. Fine, Reinhold Garbe, Tung Gip *et al.*. Non-destructive, real time direct measurement of subsurface damage[C]. *SPIE*, 2005, **5799**: 105~ 110