

光学元件磨削加工亚表面损伤检测研究

胡陈林¹ 毕 果¹ 叶 卉¹ 李洪友²

(1. 厦门大学机电工程系 厦门 361005; 2. 华侨大学机电及自动化学院 厦门 361021)

摘要: 基于氢氟酸刻蚀对光学元件亚表面裂纹影响的刻蚀模型,将化学刻蚀、逐层抛光技术和激光共聚焦扫描技术相结合,提出了一种磨削加工光学元件亚表面损伤的检测方法。实验证实该方法得到的亚表面损伤深度与公认的亚表面损伤预测模型的预测结果吻合性较好,是一种可靠的亚表面深度检测方法。

关键词: 磨削; 亚表面损伤; 蚀刻; 抛光; 检测

中图分类号: TH162+.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-985X(2014)11-2929-06

Research on Detection of Subsurface Damage on Grinding Optical Elements

HU Chen-lin¹, BI Guo¹, YE Hui¹, LI Hong-you²

(1. Department of Mechanical and Electrical Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, China;

2. College of Mechanical Engineering and Automation, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

(Received 22 May 2014, accepted 15 August 2014)

Abstract: Based on the etching model which hydrofluoric acid etching has an impact on the subsurface cracks of the optical elements, combined chemical etching, step-by-step polishing techniques and confocal laser scanner, a method of detecting sub-surface damage of the optical element was proposed. Research shows that this detection method is intuitive and effective, and the depth of subsurface damage match with the grinding results predicted by the model.

Key words: grinding; subsurface damage; etching; polishing; detect

1 引 言

随着高功率固体激光系统能量的不断提升和迅猛发展,其对于光学元件质量要求越来越高。光学元件在磨削加工过程中会产生大量的亚表面损伤,这些损伤将直接降低光学元件的强度、长期稳定性、成像质量、镀膜质量和抗激光损伤阈值等重要性能指标^[1-3]。故研究光学元件亚表面损伤形成机理和影响因素并准确测量和评估不同加工参数下的亚表面损伤形貌和特征,对后续精密加工具有非常重要的指导意义^[4]。

光学元件亚表面损伤的检测方法主要包括破坏性和非破坏性两种,国内外的众多学者都投身于这一领域的研究,其中破坏性检测方法有国防科技大学的王卓等^[5]使用磁流变抛光斑点技术测量了BK7玻璃在不同磨削条件下的亚表面损伤深度,建立了亚表面损伤深度与表面粗糙度的模型;美国罗彻斯特大学的Steven等^[6]在使用磁流变抛光技术对半导体硅片亚表面损伤检测方面,取得了较好的试验效果。非破坏性检测方法有成都精密光学工程研究中心的邓燕等^[7]基于全内反射照明原理开展了全内反射显微技术检测光学元件亚表面缺陷的实验研究,利用显微镜精密调焦对界面下一定深度处缺陷成像,实现了对缺陷点位置深度的

收稿日期: 2014-05-22; 修订日期: 2014-08-15

基金项目: 国家自然科学基金(51275433); 福建省自然科学基金(2012J05098)

作者简介: 胡陈林(1991-),男,安徽省人,硕士。E-mail: huchenglin520@qq.com

通讯作者: 毕 果,讲师,博士。E-mail: guobi@xmu.edu.cn

测量; 同济大学的马彬等^[8]利用共焦显微成像结合光散射的层析扫描技术, 对 SiC 磨料研磨后的亚表面缺陷进行了检测。本文基于氢氟酸刻蚀法、逐层抛光技术逐层去除亚表面损伤, 结合激光共聚焦扫描仪聚焦技术测得光学元件亚表面损伤深度, 并与理论模型估计的亚表面损伤深度对比, 得出不同加工参数对光学元件亚表面损伤深度的影响, 可为光学元件的加工提供一定的指导。该方法易于操作, 准确性好, 有较好的科研及应用价值。

2 光学元件亚表面损伤检测方法及预测模型

美国的 Wong 等^[11]基于氢氟酸刻蚀对光学元件亚表面裂纹的影响进行了研究, 并建立了相应的刻蚀模型。模型如图 1 所示, 在刻蚀液的作用下, 亚表面损伤层的残余应力不断得到释放, t_1 时刻之前, 光学元件的亚表面损伤裂纹逐渐转变成“碗状”坑点, 残余应力逐渐释放。 t_1 时刻, 尖锐应力集中区域和崩碎变成圆角, 亚表面损伤裂纹层残余应力有较好的释放, 裂纹完全转化为坑点但并未融合, 此时坑点数量最为密集。 t_2 时刻到 t_3 时刻, 刻蚀深度超过亚表面裂纹深度, 相邻的坑点逐渐融合成较大的坑点, 随着刻蚀时间的增加, 坑点数量逐渐减少, 刻蚀深度超过光学元件亚表面损伤深度。本文结合逐层抛光技术和激光共聚焦扫描仪成像技术, 根据坑点的密集程度, 判断元件裂纹完全转化为坑点的刻蚀时间 t_1 , 并对 t_1 时刻的元件进行实验研究, 最终获得光学元件磨削件亚表面损伤深度。检测流程如图(2)所示。

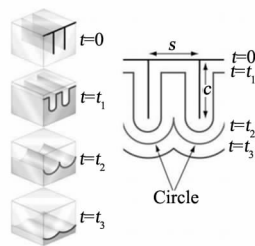


图 1 裂纹表面轮廓随刻蚀时间演化的二维几何模型
Fig. 1 Two-dimensional geometry model describing the variation of crack surface with etch time

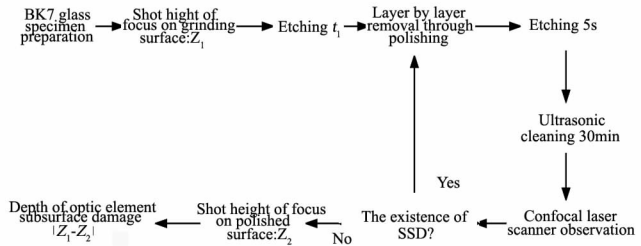


图 2 实验流程示意图
Fig. 2 Experimental flow diagram

研究表明, 在一定压力下, 金刚石磨粒压头下方产生一个非弹性变形区, 当拉应力超过材料的极限应力时, 会在材料内部产生竖直向下的中位裂纹和侧向延伸的侧向裂纹。其中, 垂直于表面延伸的中位裂纹被认为是形成亚表面缺陷的主要原因^[12]。基于尖锐压头实验研究, 根据微压痕力学模型及压痕和划痕过程之间的关系特征, 建立了如下的亚表面损伤深度和表面粗糙度之间关系模型^[13]:

$$SSD = 0.206 \tan \alpha^{-4/9} \left(\frac{EH_s}{K_c^2 \cdot \beta^2} \right)^{1/3} \left[\frac{3(1-2\nu)}{5-4\nu} + \frac{2\sqrt{3}}{\pi(5-4\nu)} \frac{E}{\sigma_y} \cot \alpha \right]^{-2/3} \cdot SR^{4/3}$$

其中, SSD 为亚表面损伤深度, SR 为 PV 粗糙度值, H_s 为材料划痕硬度, α 为压头锐度角, E 为材料弹性模量, K_c 为材料的断裂韧性, β 为弹性变形对中位裂纹的修正系数, ν 为材料泊松比, σ_y 为材料屈服应力。

3 实 验

3.1 试件制备

选用 D91 砂轮, 砂轮磨粒尺寸为 $75 \sim 90 \mu\text{m}$, 在 2MK1760 平面磨床上进行批量磨削实验, 试验装置如图 3 所示。试件材料为 BK7 玻璃抛光件, 尺寸为 $20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$, 表面光洁度为 $0.1 \mu\text{m}$, 可近似认为无亚表面损伤。选用 4 块如图 4 所示的尺寸为 $120 \text{ mm} \times 120 \text{ mm}$ 铁块, 编号①~④, 在①~④号铁块上均布 9 块试件, 采用光栅式加工路径, 每行的三块玻璃加工参数相同, 每列的加工参数不同, 4 铁块上的加工参数分别编号为 1~12 号, 加工得到如表 1 所示的 12 种加工参数的 BK7 试件。使用 Taylor Hobson PGI1240 表面轮廓仪测得实际检测的各试件表面 PV-SR 粗糙度值如表 1 所示。

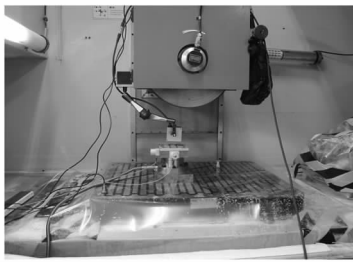


图 3 2MK1760 平面磨床

Fig. 3 2MK1760 surface grinder

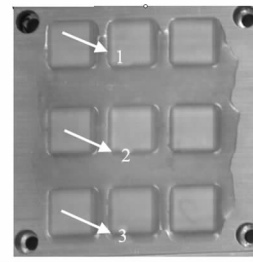


图 4 1 号铁片试件分布图

Fig. 4 Specimen distribution of No. 1 iron

为了对照验证提出的检测方法的正确性,本文采用式(1)的理论模型预测亚表面损伤深度。BK7 玻璃机械特性参数为: $E = 82 \text{ GPa}$, $H_s = 7.2 \text{ GPa}$, $K_c = 0.82 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$, $\nu = 0.206$, $\sigma_y = 2.3 \text{ GPa}$ ^[14], 弹性变形对中位裂纹的修正系数为 0.329 ^[13], 磨粒锐度角近似为压头锐度角取值 60° 。亚表面损伤深度实测值由实验测得。

表 1 加工参数和加工质量表

Table 1 Sample preparation with varied manufacturing parameters and processing quality

Number	Wheel peripheral speed/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	Feed rate/ $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$	Depth of cut/ $\mu\text{m} \cdot \text{pass}^{-1}$	PV - SR/ μm	Predicting depth/ μm	SSD depth/ μm
1	1500	5	2	10.6	20.4	19.6
2	1500	5	3	12.9	26.5	28.4
3	1500	5	5	13.6	28.3	30.1
4	1500	5	10	14.4	30.7	31.9
5	1500	5	15	15.6	34.2	32.1
6	1500	5	20	16.5	36.8	38.8
7	900	5	5	15.9	34.9	35.6
8	1200	5	5	14.4	30.7	32.4
9	1800	5	5	10.7	20.6	21.6
10	1500	3	5	12.9	26.5	28.6
11	1500	7	5	15.6	34.2	33.4
12	1500	9	5	16.4	36.4	36.7

3.2 实验步骤

取一实验陪片,其加工参数与 1 号试件一致,配置刻蚀液对其刻蚀不同时间,刻蚀液成分为 5% 氢氟酸 30 mL、40% 硝酸 30 mL 和 75% 醋酸 5 mL。使用激光共聚焦扫描仪采集刻蚀不同时间后的形貌特征图。

取洗净后的 1 号试件,使用激光共聚焦扫描仪聚焦其表面,其镜头分辨率为 $0.35 \mu\text{m}$,记下此时镜头所在高度 Z_1 ,稳定刻蚀 0.6 h 后,进行逐层抛光,每隔 2 min 取出试件置于氢氟酸刻蚀液中 5 s,去除抛光过程中所引入的水解层,并清洗,使用激光共聚焦扫描仪观测抛光后的区域,若存在“坑点”状亚表面损伤,则返回继续抛光,当抛光至 BK7 玻璃表面没有明显“坑点”状亚表面损伤时,清洗抛光后的 BK7 玻璃元件,聚焦于刻蚀抛光后的元件表面,记下此时镜头所在高度 Z_2 ,则有聚焦高度差 $|Z_1 - Z_2|$ 即为该加工参数下 BK7 玻璃试件的亚表面损伤深度。

4 结果与讨论

4.1 光学元件亚表面损伤形貌分析

图 5(a) ~ (h) 分别为刻蚀时间 0 h、0.6 h、1 h、2 h、5 h、12 h、24 h、55 h 的试件形貌特征图。由图 5(b) 可知,刻蚀时间为 0.6 h 时,亚表面损伤裂纹转变成“碗状”坑点,坑点数量最多密度最多且并未发生融合,该时刻最接近 1 号试件裂纹完全转化为坑点的刻蚀时刻 t_1 。

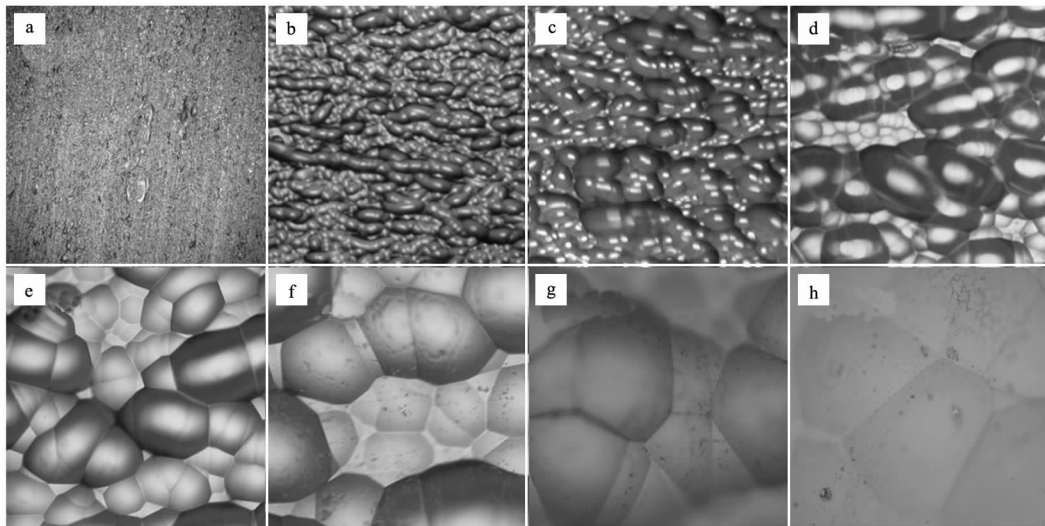


图5 1号试件刻蚀不同时间之后的光学元件亚表面损伤形貌照片
(a) 0 h; (b) 0.6 h; (c) 1 h; (d) 2 h; (e) 5 h; (f) 12 h; (g) 24 h; (h) 55 h

Fig. 5 Optical element subsurface damage morphology of No. 1 specimen after different etching time

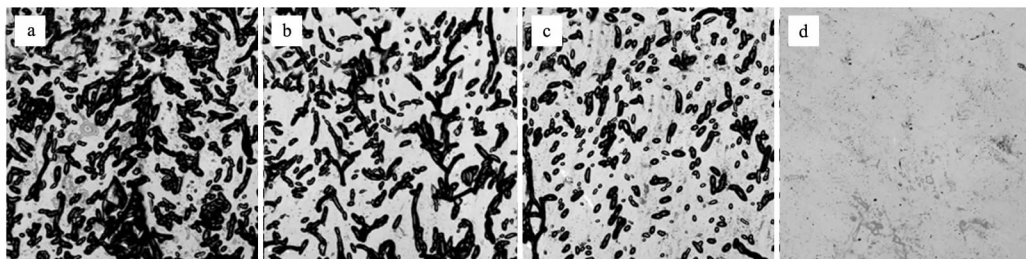


图6 1号光学元件刻蚀抛光后亚表面损伤形貌特征 (a) 8.4 μm ; (b) 10.9 μm ; (c) 16.5 μm ; (d) 19.6 μm

Fig. 6 Optical element subsurface damage morphology of No. 1 specimen with polishing

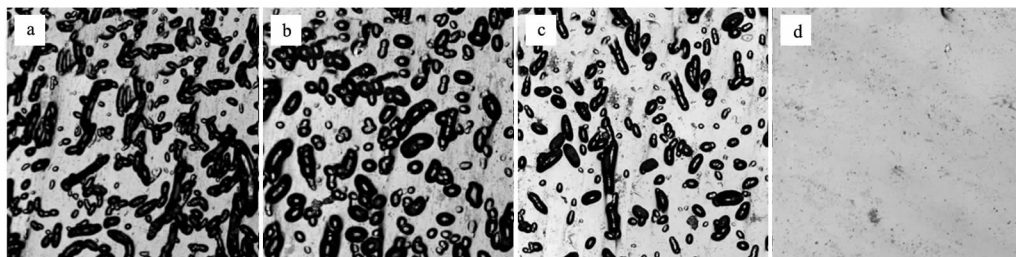


图7 7号光学元件刻蚀抛光后亚表面损伤形貌特征 (a) 15.8 μm ; (b) 21.6 μm ; (c) 33.8 μm ; (d) 35.6 μm

Fig. 7 Optical element subsurface damage morphology of No. 7 specimen with polishing

(1) 对加工后的BK7试件进行不同时间的刻蚀,刻蚀后使用200倍显微镜观测,其形貌特征如图5所示。随着刻蚀时间的增加,“碗状”凹坑的形状逐渐变大变浅且数量不断减小。实验现象与Wong等人提出的亚表面损伤模型吻合。

(2) 对刻蚀0.6h的1号试件进行逐层抛光。如图6(a)~(d)所示分别为1号光学元件距磨削表面深度8.4 μm 、10.9 μm 、16.5 μm 、19.6 μm 时的光学元件亚表面形貌。随着抛光深度逐渐增大,“碗状”坑点不断减少变浅,在距磨削表面深度为19.6 μm 时,坑点消失不见。认为在坑点消失不见时,光学元件去除层为亚表面损伤深度,因此,1号光学元件的亚表面损伤深度为19.6 μm 。

(3) 采用相同的实验过程, 可得 7 号试件的亚表面损伤深度为 $35.6 \mu\text{m}$ 。图 7(a) ~ (h) 所示分别为 7 号光学元件距磨削表面深度 $15.8 \mu\text{m}$ 、 $21.6 \mu\text{m}$ 、 $33.8 \mu\text{m}$ 、 $35.6 \mu\text{m}$ 时的光学元件亚表面形貌。对比图 6 和图 7, 7 号光学元件的凹坑略大, 逐层抛光的深度较深, 原因可能为刻蚀时刻 t_1 较 1 号片长, 导致融合成的坑点与 1 号试件有所差异。

4.2 SSD 影响因素分析

不同加工参数加工出来的光学元件的亚表面损伤深度的预测值和实测值如表 1 所示。根据表 1 可得不同加工参数对亚表面损伤深度的影响趋势如图 8 所示。分析可知:

(1) 使用基于氢氟酸刻蚀、逐层抛光结合激光共聚焦扫描仪聚焦技术方法对 12 块不同加工参数加工的 BK7 玻璃进行逐一检测, 实验测得光学元件亚表面损伤深度与公认的理论模型预测的光学元件亚表面损伤深度值有较好的一致性, 误差较小, 分析其误差产生原因可能如下: 理论模型预测的光学元件亚表面损伤深度值只含裂纹层深度并不包含残余应力层, 导致预测值和真实值有一定误差; 逐层抛光时无法精确把握亚表面损伤恰好完全去除时的抛光深度, 实际抛光深度有可能超过亚表面缺陷层, 导致所得数据比真实结果略大; 另外, 通过观察确定刻蚀时间 t_1 可能与亚表面裂纹融合成坑点时间有所出入, 从而产生一定误差。

(2) 由图(8)可知, 当其他加工参数确定时, 切深和工作台进给速度由小变大时, 亚表面损伤的深度会逐渐增大, 切深和工作台进给速度增大时, 磨粒切削深度随之增加, 导致光学元件表面的切削力和挤压力变大, 材料脆性断裂的趋势增大, 引起更大的材料碎片崩碎和更深的亚表面损伤。因此, 亚表面损伤深度增大; 当其他加工参数确定时, 砂轮转速由小变大时, 亚表面损伤的深度减小。随着砂轮转速的增大, 磨粒切削深度随之减小, 由摩擦和挤压而产生的裂纹逐渐减少, 故亚表面损伤深度减小。

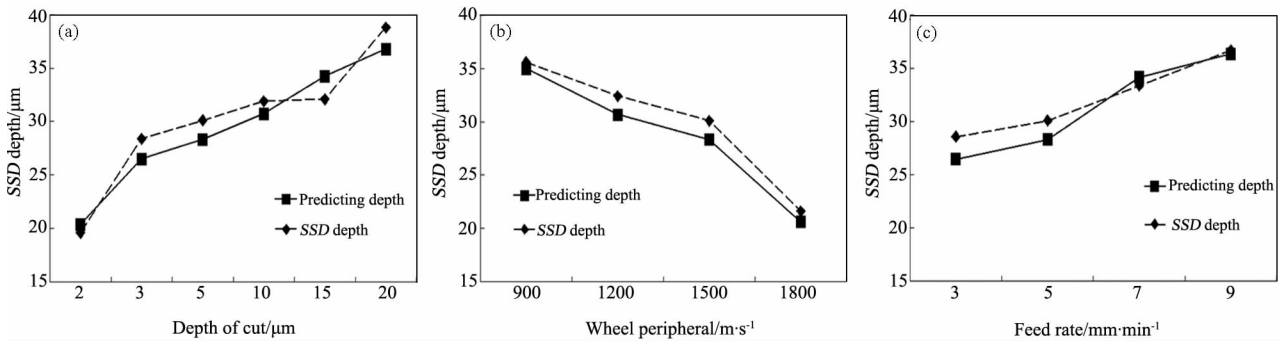


图 8 加工参数对光学元件亚表面损伤深度的影响

Fig. 8 Processing parameters have limited influence on optical element SSD depth (a) depth of cut impact on the optical element subsurface damage depth; (b) wheel peripheral speed impact on the optical element subsurface damage depth; (c) feed rate impact on the optical element subsurface damage depth

5 结 论

(1) 本文基于氢氟酸刻蚀对光学元件亚表面裂纹影响的刻蚀模型, 将化学刻蚀、逐层抛光技术和激光共聚焦扫描技术相结合, 提出了一种磨削加工光学元件亚表面损伤的检测方法, 用于检测一组加工条件变化的 BK7 光学玻璃磨削样片, 检测得到各样片的亚表面损伤深度与公认的亚表面损伤深度预测模型预测结果数值接近, 随加工参数变化的趋势一致, 证实该方法能够准确可靠的得到磨削光学材料亚表面损伤深度。(2) 由本文的光学材料批量磨削实验及检测数据结果可知, 其他加工条件不变时, 切深、工作台进给速度增大, 光学材料亚表面损伤深度也随之增大, 而在一定范围内, 砂轮转速增大时, 亚表面损伤深度有减小的趋势。

参 考 文 献

- [1] Buijs M, Houten K K. Three-body Abrasion of Brittle Materials as Studied by Lapping[J]. *Wear*, 1993, **166**: 237-245.

- [2] Shen J , Liu S , Yi K , et al. Subsurface Damage in Optical Substrates [J]. *Optik*. 2005 **116**: 288-294.
- [3] Genin F Y , Salleo A , Pistor T V , et al. Role of Light Intensification by Cracks in Optical Breakdown On surfaces [J]. *Journal of American Ceramic Society* 2001 **18**(10) : 2607-2616.
- [4] 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) : 1722-1726.
Wu D J , Cao X S , Wang Q G , et al. Damage Detection and Analysis of Machined KDP Crystal Subsurface [J]. *Optics and Precision Engineering* , 2007 **15**(11) : 1722-1726(in Chinese) .
- [5] 王 卓. 光学加工亚表面损伤检测与控制 [D]. 长沙: 国防科学技术大学博士学位论文 2008.
Wang Z. Study on the Detection and Control Techniques of Subsurface Damage in Optical Fabrication [D]. Changsha: Doctoral Dissertation of National University of Defense Technology 2008(in Chinese) .
- [6] Steven R , Arrasmit W , Stephen D , et al. The Use of Magnetorheological Finishing (MRF) to Relieve Residual Stress and Subsurface Damage on Lapped Semiconductor Silicon Wafers [J]. *Optical Manufacturing and Testing IV* 2001 **4551**.
- [7] 邓 燕, 许 乔, 柴立群. 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.
Deng Y , Xu Q , Chai L Q , 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(in Chinese) .
- [8] 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.
Ma B , Shen Z X , Zhang Z , 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(in Chinese) .
- [9] Wong L , Suratwala L. The Effect of HF/NH₄F Etching on the Morphology of Surface Fractures on Fused Silica [J]. *Journal of Non-Crystalline Solids* 2009 **355**: 797-810.
- [10] Nakamura M , Sumomogi T , Endo T. Evaluation of Surface and Subsurface Cracks on Nano-scale Machined Brittle Materials by Scanning Force Microscope and Scanning Laser Microscope [J]. *Proceedings of Frontiers of Surface Engineering* 2003 **169-170**: 743-747.
- [11] Gu W B , Yao Z Q , Li K M. Evaluation of Subsurface Crack Depth During Scratch Test for Optical Glass BK7 [J]. *Journal of Mechanical Science and Technology* 2011 **25**(5) : 1167-1174 .
- [12] John C , Lambropoulos T F , Paul D F , et al. Surface Microroughness of Optical Glasses under Deterministic Microgrinding [J]. *Applied Optics* , 1996 **35**(22) : 4448-4462.

(上接第 2922 页)

- [14] Wang E , White T P , and Catchpole K R , Resonant Enhancement of Dielectric and Metal Nanoparticle Arrays for Light Trapping in Solar Cells [J]. *Optics Express* 2012 **20**(12) : 13226-13237.
- [15] Tseng P C , Tsai M A , Yu P , et al. Antireflection and Light Trapping of Sub-wavelength Surface Structures Formed by Colloidal Lithography on Thin Film Solar Cells [J]. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* 2012 **20**(2) : 135-142.
- [16] Sturmberg B C P , Dossou K B , Botten L C , et al. Modal Analysis of Enhanced Absorption in Silicon Nano-wire Arrays [J]. *Optics Express* 2011 , **19**(S5) : A1067-A1081.
- [17] Yu Z , Raman A , Fan S. Nanophotonic Light-trapping Theory for Solar Cells [J]. *Applied Physics A* 2011 **105**(2) : 329-339.
- [18] Lu X , Lun S , Zhou T , et al. A Low-cost High-efficiency Crystalline Silicon Solar Cell Based on One-dimensional Photonic Crystal Front Surface Textures [J]. *Journal of Optics* 2013 **15**(7) : 075705-075714.
- [19] Dominguez S , Garcia O , Ezquer M , et al. Optimization of 1D Photonic Crystals to Minimize the Reflectance of Silicon Solar Cells [J]. *Photonics and Nanostructures - Fundamentals and Applications* 2012 **10**: 46-53.
- [20] Tseng P C , Tsai M A , Yu P , et al. Antireflection and Light Trapping of Subwavelength Surface Structures Formed by Colloidal Lithography on Thin Film Solar Cells [J]. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* 2012 **20**(2) : 135-142.
- [21] 陆晓东, 佘淑娟, 周 涛, 等. 超薄晶硅太阳能电池的上表面陷光结构研究 (I) [J]. 光电子·激光 2012 **23**(11) : 2066-2073.
Lu X , Lun S , Zhou T , et al. Upper-surface Light-trapping Structure on Ultrathin Crystalline Silicon Solar Cell [J]. *Journal of Optoelectronics • Laser* 2012 **23**(11) : 2066-2073.
- [22] Chutinan A , Kherani N P , Zukotynski S. High-efficiency Photonic Crystal Solar Cell Architecture [J]. *Optics Express* 2009 **17**(11) : 8871-8878.