

表面质量控制及检测

# 阵列光纤组件端面的化学机械抛光试验研究

邹文兵, 刘德福, 胡庆, 陈广林

(中南大学 机电工程学院, 长沙 410083)

**摘要:** 目的 设计合理的抛光工艺方案, 获得平整的阵列光纤组件端面。方法 采用单因素实验法研究抛光工艺参数对阵列光纤表面粗糙度与光纤凸起量的影响, 利用光学表面轮廓仪与扫描电镜进行分析与观察。结果 在抛光液磨粒质量分数为 2%, 抛光液流量为 15 mL/min, 抛光压力为 50 kPa, 抛光盘转速为 30 r/min 的条件下, 可以获得平整的阵列光纤组件端面。结论 应用化学机械抛光技术加工阵列光纤组件, 并设计合理工艺方案, 可获得平整的阵列光纤组件端面, 其表面粗糙度可低至 42.6 nm, 光纤凸起值可低至 0.14  $\mu\text{m}$ 。

**关键词:** 阵列光纤组件端面; 化学机械抛光; 表面粗糙度; 光纤凸起量

中图分类号: TG175      文献标识码: A      文章编号: 1001-3660(2015)04-0132-05

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2015.04.024

## Experimental Research on Chemical Mechanical Polishing of End Face of Optical Fiber Array

ZOU Wen-bing, LIU De-fu, HU Qing, CHEN Guang-lin

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

**ABSTRACT:** **Objective** To obtain the flat end face of optical fiber array by designing proper polishing process plan. **Methods** The effects of polishing process parameters on the surface roughness of the optical fiber array and fiber projection were studied using single factor experiments, and the surface morphology was examined by Scanning Electronic Microscope and Optical Profilometer. **Results** Flat end face of optical fiber array was obtained under the conditions of particle concentration of 2%, polishing slurry flow rate of 15 mL/min, polishing pressure of 50 kPa, and rotation speed of 30 r/min. **Conclusion** Using chemical mechanical polishing to process optical fiber array, in combination with designing proper polishing process parameters, a perfect end-face of optical fiber array with surface roughness of 42.6 nm and fiber projection of 0.14  $\mu\text{m}$  was achieved.

**KEY WORDS:** end face of optical fiber array; chemical mechanical polishing; surface roughness; fiber projection

收稿日期: 2015-01-08; 修订日期: 2015-02-27

Received: 2015-01-08; Revised: 2015-02-27

基金项目: 国家自然科学基金(51275534); 湖南省自然科学基金(2015JJ2153)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China(51275534) and the Natural Science Foundation of Hunan Province(2015JJ2153)

作者简介: 邹文兵(1988—), 男, 湖南人, 硕士生, 主要研究方向为精密制造。

Biography: ZOU Wen-bing (1988—), Male, from Hunan, Master graduate student, Research focus: precision machining

通讯作者: 刘德福(1971—), 男, 湖南人, 博士生导师, 主要研究方向为精密制造。

Corresponding author: LIU De-fu (1971—), Male, from Hunan, Doctoral supervisor, Research focus: precision machining

阵列光纤组件是集成光电子器件的关键组成部分,采用直接对接耦合与光电子芯片的光路相连接。如果阵列光纤组件的表面粗糙、不平整,对接耦合后会产生横向间隙、角度倾斜等,将大大降低信号系统的传输效率<sup>[1]</sup>。要获得传输效率高的阵列光纤组件须降低其表面粗糙度与光纤凸起量。阵列光纤组件是由单晶硅基底、石英玻璃光纤、耐热玻璃盖板通过 UV 固化胶粘接而成的组合器件(如图 1 所示)。根据 Preston 方程<sup>[2]</sup>可知,由于单晶硅、石英光纤的力学性能具有较大差异(见表 1),会引起方程系数的改变<sup>[3]</sup>,致使异质材料去除率存在差异,较硬的石英光纤呈现凸起现象,不利于组件端面表面平整性的提高。对阵列光纤组件端面的加工一般采用抛光,在传统的机械抛光中,主要是依靠抛光磨粒切入被抛光材料并促使其脆性崩裂以实现材料的去除,相应的加工表面易形成微裂纹,故而表面质量不佳<sup>[4]</sup>。

化学机械抛光(CMP)技术是机械磨削和化学腐蚀相结合的抛光技术,它借助超微磨粒的机械作用及抛光液的化学腐蚀作用形成光洁平坦表面<sup>[5]</sup>。在 CMP 过程中,一方面材料表面因化学腐蚀作用形成软质层<sup>[6]</sup>,既降低了磨粒对基体的刻划作用,使脆硬材料的材料去除形式由脆性去除向塑性去除转变<sup>[7]</sup>,又有效减少了异质材料间的加工性能差异;另一方面超微磨粒的机械作用不断作用于软质层,实现材料的塑性去除,同时提高了抛光效率和抛光表面质量<sup>[10]</sup>。

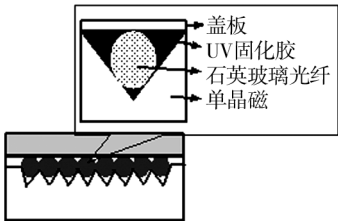


图 1 阵列光纤组件端面示意

Fig. 1 The schematic of the end face of optical fiber array

表 1 石英光纤、单晶硅材料的力学性能<sup>[8-9]</sup>  
Tab. 1 The mechanical properties of quartz fiber and monocrystalline silicon materials

材料名称	莫氏硬度	弹性模量/GPa	泊松比	断裂韧性/(MPa·m <sup>1/2</sup> )
SiO <sub>2</sub> 光纤	7	72.1	0.17	0.794
单晶硅	6.5	130	0.278	0.6~1.65

本文采用 CMP 技术加工阵列光纤组件,研究化学机械抛光基本工艺参数对阵列光纤组件表面粗糙

度与石英光纤凸起量的影响。

1 试验

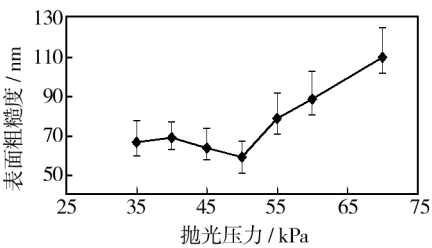
试件选用深圳飞宇光纤系统公司生产的 8 芯阵列光纤,经过粗磨、半精抛工艺处理。选用上海大学纳米科学与技术研究中心研制的平均粒径为 80 nm 的氧化硅抛光液作为抛光介质。抛光垫材质为聚氨酯(弹性模量  $E=10\text{ MPa}$ )。阵列光纤组件的抛光设备采用深圳昌宏机电设备有限公司制造的 YM-15TX 型精密研磨抛光机。阵列光纤的装夹由专用夹具实现。

选取评价区域包含整个光纤以及光纤与基底、光纤与盖板的结合处。采用美国 Veeco 公司的 WYKO NT9100 型轮廓仪与捷克 Tescan 公司的 MIRA3 LMU 型扫描电镜进行观察与分析。为降低数据误差,每组试验选取 8 个样品,计算平均值。

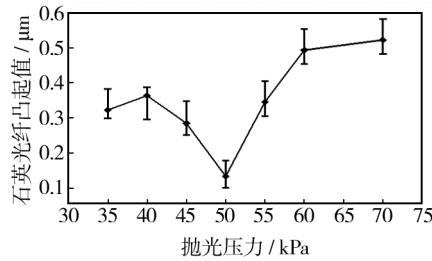
2 结果与分析

2.1 抛光压力对表面平整性的影响

试验设定抛光转速为 30 r/min,抛光液流量为 30 mL/min,抛光液磨粒质量分数为 5%,抛光时间为 30 min,改变抛光压力对阵列光纤组件进行抛光。抛光压力与表面粗糙度及光纤凸起量的关系如图 2 所示。



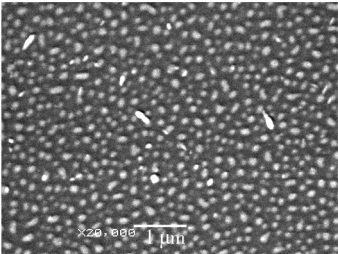
a 抛光压力与表面粗糙度的关系



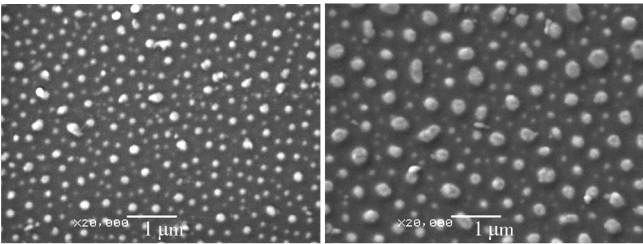
b 抛光压力与光纤凸起量的关系

图 2 抛光压力与表面粗糙度及光纤凸起量的关系  
Fig. 2 The relationship of  $R_a$  and fiber projection with polishing pressure

抛光压力为 35 kPa 时,抛光垫的变形较小,抛光颗粒主要游离于抛光垫的凹坑中,抛光粒子的机械作用不明显,材料的去除主要依靠抛光液的化学作用和抛光垫的微弱机械作用,材质较硬的石英光纤去除较少,其表面微观形貌如图 3a 所示。当抛光压力为 50 kPa 时,抛光过程中的化学作用与机械作用达到平衡的状态,试件表面粗糙度值降低,光纤凸起值明显降低,石英光纤微观形貌如图 3b 所示。当抛光压力为 50 ~ 70 kPa 时,试件表面粗糙度随压力的上升而增加,光纤凸起值也随压力上升而增大,阵列光纤组件端面平整性下降,这是因为压力增大时,抛光垫变形较大,增强了抛光过程三体磨损的接触应力<sup>[11]</sup>。抛光压力增大到一定程度时,抛光液中 SiO<sub>2</sub> 抛光粒子的机械磨削作用过强,致使试件的表面粗糙度下降,材料去除率差异增大,光纤凸起值上升。当抛光压力为 70 kPa 时石英光纤微观形貌如图 3c 所示。因此在阵列光纤组件的抛光过程中,抛光压力以 50 kPa 左右为宜。



a 35 kPa



b 50 kPa

c 70 kPa

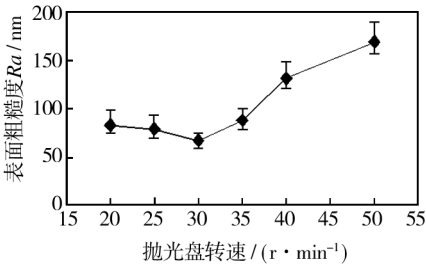
图 3 不同抛光压力下的石英光纤微观形貌

Fig. 3 Microstructure of quartz fiber under different polishing pressure

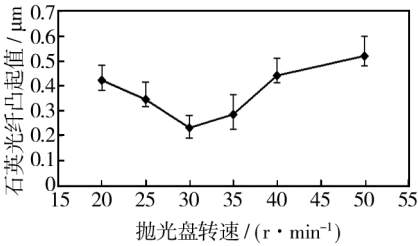
2.2 抛光盘转速对表面平整性的影响

图 4 所示抛光盘转速与阵列光纤组件表面粗糙度及光纤凸起量的关系,抛光压力为 50 kPa,抛光液流量为 30 mL/min,抛光液磨粒质量分数为 5% 时,改变抛光盘转速对阵列光纤组件进行抛光。

由 Preston 方程可知,当其它抛光参数一定时,抛



a 抛光盘转速与表面粗糙度的关系



b 抛光盘转速与光纤凸起值的关系

图 4 抛光盘转速与阵列光纤组件表面粗糙度及光纤凸起量的关系

Fig. 4 The relationship of Ra and fiber projection with rotation speed

光过程中的材料去除率与抛光速度成正比。随着抛光转速的上升,试件上任意一点在抛光过程中的平均速度增大,试件与抛光垫之间的相对行程增大<sup>[12]</sup>,抛光液液膜厚增大<sup>[13]</sup>。更多的抛光颗粒进入接触区,机械作用增强,试件表面粗糙度与光纤凸起值逐渐降低,试件表面趋近平整。当抛光盘转速进一步上升,试件在抛光过程中的平均速度进一步上升,试件相对抛光垫的行程进一步增大,致使材质的去除率上升,异质材料间的去除差异明显增加,光纤凸起值增加,试件表面的平整性变差。

图 5 为不同抛光盘转速下的试件表面最大凸起轮廓,图示中间区域为石英光纤,轮廓线表示试件表面相对于理想平面的凸起程度,右侧为玻璃盖板。从图 5 可以看出,当抛光转速为 20 r/min 时,石英光纤相对于单晶硅与玻璃盖板而言整体凸起,表面平整性较差,这是因为较弱的机械作用尚未消除粗抛后的光纤凸起,如图 5a 所示。当抛光转速为 30 r/min 时,石英光纤整体平坦,与异质材料的高度差异较低,如图 5b 所示。当抛光转速为 50 r/min 时,单晶硅材料去除较多,由于 UV 固化胶的保护作用,石英光纤左侧去除量较低,右侧逐渐与玻璃盖板平齐,整体成坡度去除,平整性变差,如图 5c 所示。故在阵列光纤组件的抛光过程中,抛光盘转速以 30 r/min 为宜。

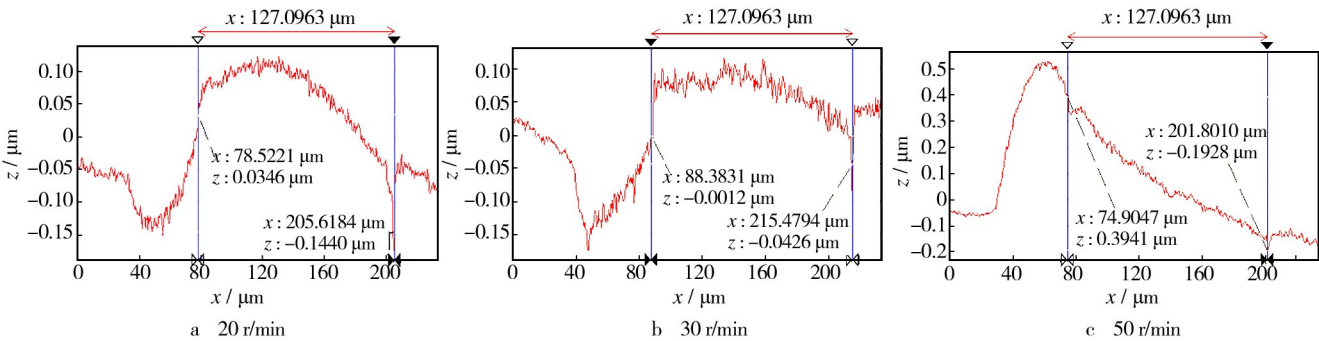


图 5 不同抛光盘转速下的试件表面轮廓

Fig.5 Surface profile of optical fiber array under different rotation speed

2.3 抛光液流量对表面平整性的影响

在阵列光纤组件的化学机械抛光过程中,抛光液的化学作用能降低石英光纤表层的硬度和弹性模量,改善石英光纤的抛光性能<sup>[13]</sup>,降低阵列光纤组件异质材料的加工性能差异;同时抛光液流量的增加会引起润滑膜厚度的增大<sup>[14]</sup>,致使试件-磨粒-抛光垫的三体磨粒磨损程度发生变化。设定抛光压力为 50 kPa,抛光转速为 30 r/min,抛光液磨粒质量分数为 5%,只改变抛光液流量进行抛光,抛光液流量与试件表面的粗糙度及光纤凸起的关系如图 6 所示,其对应的试件

表面形貌如图 7 所示。当抛光液流量为 5 mL/min 时,抛光过程中的机械作用不明显,试件表面粗糙,如图 7a 所示;当抛光液流量为 15 mL/min 时,试件表面的粗糙度值较低,光纤凸起量较少,试件表面平坦,如图 7b 所示;当抛光液流量上升到 30 mL/min 时,试件表面的光纤凸起量增加,表面粗糙度值上升;当抛光液流量进一步上升到 50 mL/min,试件表面的光纤凸起量进一步增大,并在单晶硅与石英光纤结合处在单晶硅材料一侧呈现明显的凹陷现象,如图 7c 所示。故当抛光液流量为 15 mL/min 时,阵列光纤组件可获得较好的抛光质量。

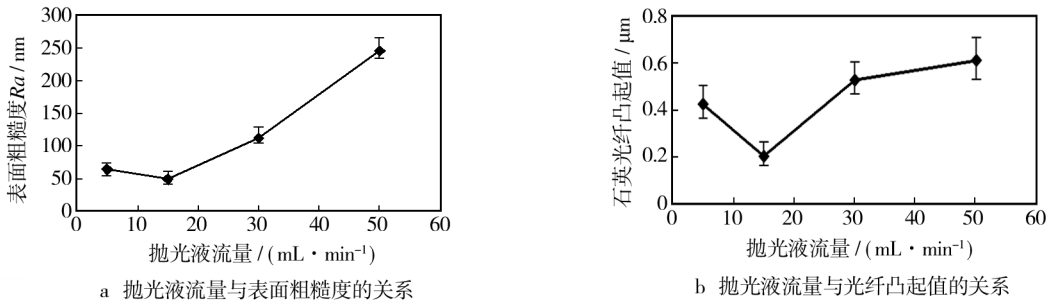


图 6 抛光液流量与试件表面的粗糙度及光纤凸起的关系

Fig.6 The relationship of Ra and fiber projection with flow rate of polishing slurry

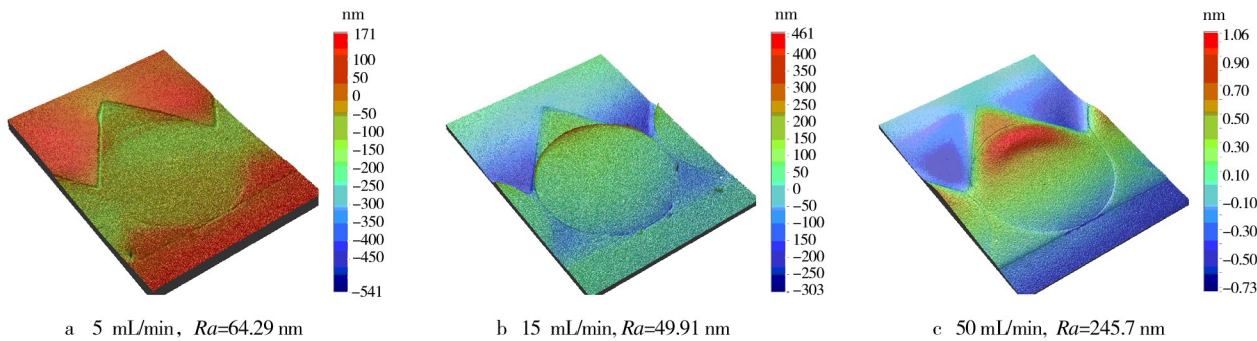


图 7 不同抛光液流量对应的试件表面形貌

Fig.7 Surface profile of optical fiber array under different flow rate of polishing slurry



## 2.4 抛光液浓度对表面粗糙度的影响

当抛光液的流量一定时,抛光液浓度决定着参与抛光的磨粒数量,从而影响试件-磨粒-抛光垫的三体磨损情况。故在选择合适的抛光液流量的同时,也应该选择合适浓度的抛光液。

设定抛光压力为 50 kPa,抛光转速为 30 r/min,抛光液流量为 15 mL/min,改变抛光液中磨粒的质量分数进行抛光,磨粒质量分数与试件表面的粗糙度及光纤凸起关系如图 8 所示。

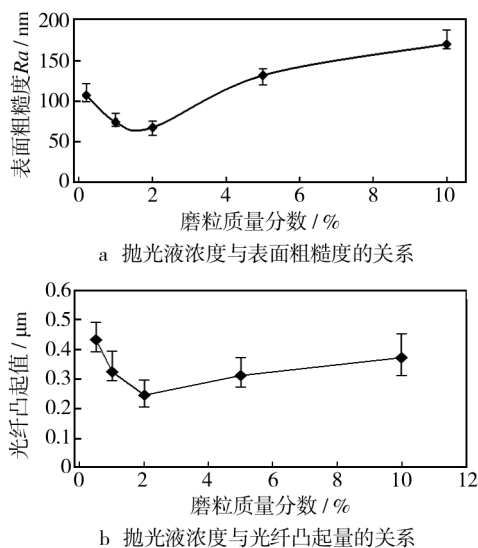


图 8 抛光液浓度与试件表面的粗糙度及光纤凸起的关系  
Fig. 8 The relationship of  $R_a$  and fiber projection with particle concentration

抛光液浓度过低时,抛光中的机械作用主要由抛光垫实现,化学作用占主导地位,石英光纤凸起值未见明显降低,试件表面较粗糙;而当抛光液浓度过高时,抛光过程中机械作用过强,致使试件表面异质材料的去除一致性变差。当抛光液质量分数为 2% 左右时,试件可获得较好的表面平整性。

## 3 结论

本文研究了抛光基本工艺参数对阵列光纤组件端面表面粗糙度与石英光纤凸起量的影响,较优工艺参数是:抛光液磨粒质量分数为 2%,抛光液流量为 15 mL/min,抛光压力为 50 kPa,抛光盘转速为 30 r/min。通过试验,可以得到较平整的阵列光纤组件端面,其表面粗糙度可低至 42.6 nm,石英光纤凸起值低至 0.14  $\mu\text{m}$ ,有利于阵列光纤组件与平面光波导器件

耦合效率的提高。

## 参考文献

- [1] 郑煜. 阵列波导器件耦合封装机理及其关键技术研究 [D]. 长沙:中南大学,2012.  
ZHENG Yu. Study on the Coupling Packaging Theory and the key Techniques for Arrayed waveguide devices [D]. Changsha: Central South University, 2012.
- [2] PRETON F W. Glass Technology [J]. Journal of the Society of Glass Technology, 1927, 11: 277—281.
- [3] 计时鸣,李琛,谭大鹏,等. 基于 Preston 方程的软性磨粒流加工特性 [J]. 机械工程学报, 2011, 47 (17): 156—163.  
JI Shi-ming, LI Chen, TAN Da-peng, et al. Study on Machinability of Softness Abrasive Flow Based on Preston Equation [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47 (17): 156—163.
- [4] 陈晓苹,王朋,李俊峰,等. 玻璃质光学元件表面微裂纹的研究 [J]. 中国光学与应用光学, 2010, 3 (4): 318—324.  
CHEN Xiao-ping, WANG Peng, LI Jun-feng, et al. Study on Surface Micro-cracks of Citreous Optics [J]. Chinese Journal of Optics and Applied Optics, 2010, 3 (4): 318—324.
- [5] LI Jing. Material Removal Mechanism of Copper CMP from a Chemical-mechanical Synergy Perspective [J]. Tribology Letters, 2013, 49: 11—19.
- [6] CHOI S. A Model of Material Removal and Post Process Surface Topography for Copper CMP [J]. Procedia Engineering, 2011, 19: 73—80.
- [7] 崔丹,李淑娟. 脆硬材料塑性区域加工研究综述 [J]. 兵器材料科学与工程, 2014, 37 (1): 125—132.  
CUI Dan, LI Shu-juan. Review on Ductile Regime Machining of Hard and Brittle Materials [J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2014, 37 (1): 125—132.
- [8] 扎齐斯基. 玻璃与非晶态材料 [M]. 北京:科学出版社, 2001.  
ZARZYCKI J. Glass and Amorphous Materials [M]. Beijing: Science Press, 2001.
- [9] HOPCROFT M. What is the Young's Modulus of Silicon [J]. IEEE Journal of Micro Electromechanical Systems, 2010, 19 (2): 229—238.
- [10] HXUMYV W. Analyses and Experimental Confirmation of Removal Performance of Silicon Oxide Film in the Chemical-mechanical Polishing (CMP) Process with Pattern Geometry of Concentric Groove Pads [J]. Wear, 2011, 270 (3/4): 172—180.

(下转第 146 页)

- [15] 绍东. 光学玻璃抛光用稀土抛光粉的制备[J]. 稀土, 2002,23(6):46—49.  
SHAO Dong. Optical Glass Polishing Rare Earth Polishing Powder Preparation[J]. Rare, 2002, 23(6):46—49.
- [16] 何峰. 硫酸钙和硫酸镁晶须对复合树脂维氏硬度的影响[J]. 口腔医学, 2011, 31(3):154—156.  
HE Feng. Impact of Calcium Sulfate and Magnesium Sulfate Whisker Composite Resin Vickers Hardness[J]. Stomatology, 2011, 31(3):154—156.
- [17] 李印江, 雷建荣, 胡在簋. 磨具配方的配料比设计[J]. 磨

料磨具与磨削, 1992, 3:34—38.

LI Yan-jiang, LEI Jian-rong, HU Zai-Gui. Recipe Ingredients Abrasive than Design[J]. Abrasives and Grinding, 1992, 3:34—38.

- [18] 刘莉, 辛振祥. 配方优化设计方法简介[J]. 橡塑技术与装备, 2004, 30(10):8—12.  
LIU Li, XIN Zhen-xiang. About Recipe Optimization Method [J]. Plastics Technology and Equipment, 2004, 30(10):8—12.

(上接第 136 页)

- [11] 郁炜, 吕冰海, 袁巨龙. 精密陶瓷球体研磨过程中材料去除模型的研究[J]. 华中科技大学学报, 2014, 42(2):74—76.  
YU Wei, LYU Bin-hai, YUAN Ju-long. The Study of Material Removal Model in the Lapping Process of the Precision Ceramic Ball[J]. Journal of Huazhong University of Science, 2014, 42(2):74—76.
- [12] 王志友, 吕玉山. 新型光纤连接器端面研磨抛光机的运动分析[J]. 机械工程师, 2007(8):38—40.  
WANG Zhi-you, LYU Yu-shan. Analysis on the Kinematics of a New Lapping and Polishing Machine for the Fiber Optical Connector End Surface[J]. Mechanical Engineer, 2007(8):38—40.
- [13] 郁炜, 吕讯, 楼飞燕. CMP 加工过程中抛光速度对液膜厚

度的影响分析[J]. 轻工机械, 2008, 26(6):97—99.

YU Wei, LYU Xun, LOU Fei-yan. Effect of Polishing on Slurry Film Thickness in Chemical Mechanical Polishing [J]. Light Industry Machinery. 2008, 26(6):97—99.

- [14] 仇中军, 尹萍, 卢翠, 等. 石英玻璃表面改性后的力学特性分析[J]. 材料科学与工程学报. 2013, 31(1):6—9.  
QIU Zhong-jun, YI Ping, LU Cui, et al. Mechanical Property Analysis of Modified Quartz Glass[J]. Journal of Materials Science & Engineering, 2013, 31(1):6—9.
- [15] 顾欣, 张晨辉, 雒建斌, 等. 石英光纤端面的化学机械抛光试验研究[J]. 摩擦学学报, 2008, 28(1):11—17.  
GU Xin, ZHANG Chen-hui, LUO Jian-bin, et al. Research on Polishing End Face of Silica Optical Fiber[J]. Tribology, 2008, 28(1):11—17.

(上接第 140 页)

- PENG jin, XIA lin, ZOU wen-jun. Research Status and Prospect of Chemical Mechanical Polishing Slurry[J]. Surface Technology, 2012, 41(4):95—98.
- [9] 王吉翠, 邓乾发, 周兆忠, 等. 蓝宝石晶片机械化学研磨抛光新方法研究[J]. 表面技术, 2011, 40(5):11—103.  
WANG Ji-cui, DENG Qian-fa, ZHOU Zhao-zhong, et al. The Study on the Method of Mechano- chemical Polishing about the Grinding Polishing of Sapphire[J]. Surface Technology, 2011, 40(5):11—103.
- [10] 徐进, 雒建斌. 超精密表面抛光材料去除机理研究进展[J]. 科学通报, 2004, 49(17):1700—1705.  
XU Jin, LUO Jian-bin. Research Progress of Material Removal Mechanism of Surface Polishing with Ultra Precision[J]. Chinese Science Bulletin, 2004, 49(17):1700—1705.
- [11] ZHANG Yin-xia. Study on Subsurface Damage Model of the Ground Monocry Stallinge Silicon Wafers[J]. Key Engineering Material, 2009, 416:66—70.
- [12] 赵永武, 刘家浚. 半导体芯片化学机械抛光过程中材料去除机理研究进展[J]. 摩擦学学报, 2004, 24(3):283—

287.

ZHAO Yong-wu, LIU Jia-jun. Recent Progress in Study on Material Removal Mechanisms of Silicon Wafer During Chemical Mechanical Polishing [J]. Tribology, 2004, 24(3):283—287.

- [13] 刘幸龙. 固结磨料研磨 SiC 晶体基片研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2013.  
LIU Xing-long. Study on Fix-Abrasive Lapping SiC Crystal Substrate[D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2013.
- [14] 陈魁. 试验设计与分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.  
CHEN Kui. Experimental Design and Analysis [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005.
- [15] 刘瑞江, 张业旺. 正交试验设计和分析方法研究[J]. 实验技术与管理, 2010, 27(9):52—55.  
LIU Rui-jiang, ZHANG Ye-wang. Study on the Design and Analysis Methods of Orthogonal Experiment[J]. Experimental Technology and Management, 2010, 27(9):52—55.