

文章编号 1004-924X(2013)04-0955-08

抛光介质对固结磨料化学机械抛光水晶的影响

居志兰^{1,2}, 朱永伟^{1*}, 王建彬¹, 樊吉龙¹, 李 军¹

(1. 南京航空航天大学 机电学院 江苏省精密与微细制造技术重点实验室, 江苏 南京 210016;

2. 南通大学机械工程学院, 江苏 南通 226019)

摘要:在固结磨料化学机械抛光中, 工件表面与抛光介质易发生水解反应, 产生软化层, 而软化层厚度直接影响材料去除速率及表面质量。本文采用显微硬度计测量了不同介质条件下水晶表面的变质层厚度, 并基于 CP-4 研磨抛光平台研究了不同抛光介质及温度对材料去除速率的影响, 进而在线测量了抛光过程中声发射信号及抛光垫与工件之间摩擦系数的变化。结果表明: 六偏磷酸钠的加入可促进水晶玻璃表层网络结构断裂, 软化表层, 软化层厚度随着浸泡时间、温度升高而增加, 进而提高了水晶玻璃的去除率; 而且随着温度升高, 水解作用更加明显。实验显示, 声发射信号及摩擦系数实时测量对抛光工艺参数的优化具有指导意义。

关键词: 抛光介质; 固结磨料; 化学机械抛光; 软化层; 显微硬度; 材料去除速率

中图分类号: TN305.2; TG74 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20132104.0955

Effect of slurries on chemical mechanical polishing of decorative glasses by fixed-abrasive pad

JU Zhi-lan^{1,2}, ZHU Yong-wei^{1*}, WANG Jian-bin¹, Fan Ji-long¹, Li jun¹

(1. Jiangsu Province Key Laboratory of Precision and Micro-Manufacturing Technology,
College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of

Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. School of Mechanical Engineering, Nantong University, Nantong 226019, China)

* Corresponding author, E-mail: meeywzhu@nuaa.edu.cn

Abstract: In chemical mechanical polishing by a fixed-abrasive pad, the hydrolysis between workpiece and slurries will form a softened layer on the glass substrate to effect on the Material Removal Rate (MRR) and surface quality. The influence of polishing slurries on the surface hardness of decorative glass is analyzed by the micro-hardness method in this paper. The effects of different slurries and temperatures on the MRR were investigated using a CP-4 lapping and polishing platform. Both the dynamic Acoustic Emission (AE) and Coefficient of Friction (COF) were continuously monitored in-situ during the polishing process. The results show that the network structure on the decorative glass surface is collapsed when the sodium hexametaphosphate was added to the slurries, and this layer is softer than the glass, which improved the material removal rate. With the temperature increased, the hy-

收稿日期: 2012-12-05; 修订日期: 2013-02-01.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 51175260); 江苏省自然科学基金资助项目 (No. BK2010516); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目 (No. NP2012516); 江苏省高校优势学科建设工程资助项目

drollysis effect is more obviously. Direct real-time monitoring of AE and COF can offer constructive significance for optimizing process parameters of polishing.

Key words: polishing slurry; fixed-abrasive; chemical mechanical polishing; softened layer; micro-hardness; material removal rate

1 引言

水晶玻璃工艺品具有高的折射率、透过率和密度,被广泛应用于制造高档水具、餐具、灯具、首饰、仿珠宝和艺术品。要加工高表面质量的水晶玻璃工艺品,必须进行研磨和抛光。固结磨料化学机械抛光(Fixed-Abrasive Chemical Mechanical Polishing, FA-CMP),是一种绿色环保加工技术,可实现水晶玻璃的超光滑加工。

抛光液的选择在固结磨料加工中占有重要地位,抛光液的性能直接影响材料去除速率(MRR)和抛光后表面的质量。抛光液一般由表面活性剂、pH 缓冲剂、氧化剂等组成,主要起化学作用。Okiharuru Kirino 等^[1]利用电解水抛光液抛光 Cu 表面,可得到超平坦超光滑镜面,但 MRR 有所下降;Makoto Sato 等^[2]用整合树脂将磨料固结在基质中,对 Cu 进行化学机械抛光,大大降低了“过抛”和“腐蚀”,且 MRR 提高;S. Pandija 等^[3]用草酸和双氧水对 Cu 进行固结磨料抛光,MRR 是 pH 值和双氧水浓度的函数。王碧玲等^[4]对软脆易潮解磷酸二氢钾(KDP)功能晶体,采用非水基无磨料抛光液抛光,研究了不同加工参数对晶体材料去除率和已加工表面质量的影响。固结磨料加工的材料去除机理为化学反应及机械摩擦,但缺少直接的在线检测及依据,化学反应的不确定性及机械摩擦的复杂性增加了机理研究的难度。近年来,国内外学者对声发射技术应用用于晶片化学机械抛光摩擦学在线检测及抛光机理开展了一些研究。Arun. Sikder 等^[5]通过监控声发射及摩擦系数数据来研究抛光垫和晶片间的摩擦学性能;A. K. Sikder^[6]分析了不同层薄膜(SiO₂、SiC、low-k B、low-k C、Ta 和 Cu)背压力和平台转速对声发射(AE)及摩擦系数(COF)的影响关联;Jung-Taik Lee 等^[7]利用在线采集系统观察抛光垫与晶片间背压力和温度;徐驰等^[8]对化学机械抛光(CMP)过程中扭矩和摩擦力进行了在线检测,并研制了相应的 CMP 终点检测系统。但针

对适用于水晶玻璃固结磨料加工的抛光介质及材料去除机理研究并未见报道。

上述研究大多都是针对研抛过程中的一个或几个因素对某一种 MRR 及加工质量的影响,极少有研究涉及到抛光液介质及温度对材料去除率与抛光过程中动态参数的变化规律。本文采用显微硬度测试方法,分析了水晶玻璃在不同介质中的变质层状况;以 AE 和 COF 为依据,来评价固结磨料加工水晶玻璃的加工性能,以期获得适当的材料去除速率(MRR)。

2 试验设计

2.1 固结磨料化学机械抛光(FA-CMP)工作原理

固结磨料抛光技术是将磨料固结在抛光垫中,抛光液由去离子水和简单的化学试剂组成,不再添加磨粒,在抛光时,只有固结在抛光垫上突出部位的磨粒才与晶片上相接触部位发生反应,造成材料的去除,由于接触区域的减小,微小接触区域产生局部较大的压力使材料去除速率增加,其加工原理如图 1 所示。

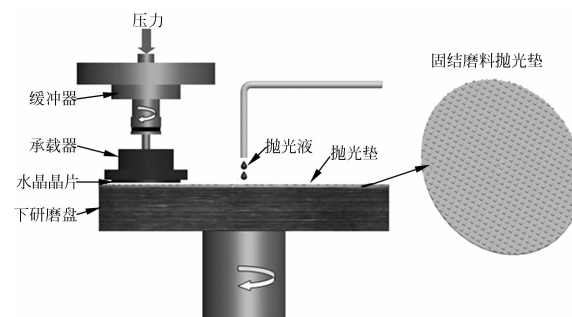


图 1 FA-CMP 加工示意图

Fig. 1 Schematic diagram of Fixed-abrasive CMP

2.2 试验设计

试验中采用的研磨抛光垫是一种以 5~7 μm 金刚石微粒作为磨料、树脂为基体,经由热固化制备而成的亲水性 FAP,其表面具有正方小突起阵列结构,沟槽便于输送抛光液和排泄抛光产物。

分别将 20 ℃去离子水溶液、20 ℃六偏磷酸钠溶液、40 ℃去离子水溶液、40 ℃六偏磷酸钠溶液、60 ℃去离子水溶液和 60 ℃六偏磷酸钠溶液 6 种不同研抛液先后放置于水浴缸;采用 CP-4 对水晶晶片进行抛光,其研抛工艺参数如表 1 所示,在线采集其声发射信号(AE)及摩擦系数信号(COF)。分别采用 MITUTOYO 工具显微镜、NANOMAP500LS 三维轮廓仪测量研抛后水晶玻璃表面微观形貌和三维轮廓形貌。

表 1 CP-4 研抛工艺参数

Tab. 1 Lapping process parameters of CP-4

工艺参数	抛光盘/头 转速/ $r \cdot \text{min}^{-1}$	抛光液流速 ($\text{ml} \cdot \text{min}^{-1}$)	研抛压力 /Psi	抛光时间 /min
	145/150	100	2	10

2.3 材料去除速率(MRR)的评价

采用赛多利斯 BS224S 精密分析天平(精度为 0.1 mg)测量加工前后工件的质量,加工过程中水晶玻璃的材料去除速率由式(1)计算。

$$\text{MRR} = \frac{(M_0 - M) \times h}{M_0 \times t} \times 10^6, \quad (1)$$

式中: h 为加工前工件初始厚度; M_0 和 M 为水晶玻璃加工前后的质量; t 为研抛时间。为确保金刚石固结磨料研抛垫加工性能的一致性,每次研抛前先用修整器对研抛垫修整 20 s。

2.4 表面软化层的显微硬度测量

先将直径为 3 英寸的水晶玻璃用 W5-7 固结磨料抛光垫抛光,之后划片,制成 6 mm × 6 mm 大小的样件。将样件浸泡在研抛液(研抛液由 1%wt 的六偏磷酸钠加适量的表面活性剂、乳化剂及 pH 调节剂组成)与去离子水中,浸泡时间分别为 0、5、15、25 和 35 min。浸泡结束后快速取出样件,用滤纸迅速将样件表面吸干。采用显微硬度计 HXS-1000AK 测量硬度,加载载荷为 50 g,保压时间为 10 s,每个样本取 10 点,取其平均值来表征。

3 实验结果与分析

3.1 不同工艺条件下的材料去除速率

根据式(1)计算出不同工艺条件下材料去除速率,其结果如图 2 所示。

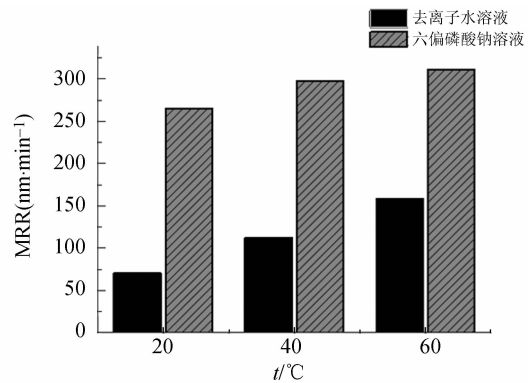
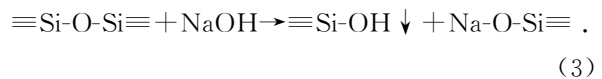


图 2 不同抛光液下水晶玻璃的 MRR

Fig. 2 MRR of decorative glasses in different slurries

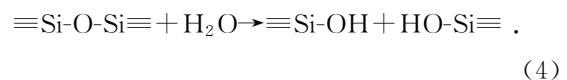
图 2 表明,60 ℃六偏磷酸钠研抛液下水晶抛光 MRR 去除率最大,其 MRR 为 311.11 nm/min,20 ℃去离子水研抛液其 MRR 仅为 70.09 nm/min,六偏磷酸钠作为弱碱性($\text{PH} > 7$)物质,研抛液中较高浓度 OH^- 离子吸附到水晶表面网络结构中,与硅原子发生亲核反应,在抛光液中发生了如下化学反应:



导致硅氧键断裂,从而破坏玻璃的网络结构,作用时间越长,富集在溶液中的 OH^- 离子越易侵蚀水晶表面,玻璃网络结构逐步解体,玻璃一层层发生水解反应;生成的硅酸凝胶薄膜往往呈多孔状或因龟裂而产生裂纹,便于抛光垫中金刚石颗粒对软化层机械摩擦去除,磨屑进入研抛液中被带走。于是碱进一步侵蚀玻璃的网络体,化学作用周而复始。

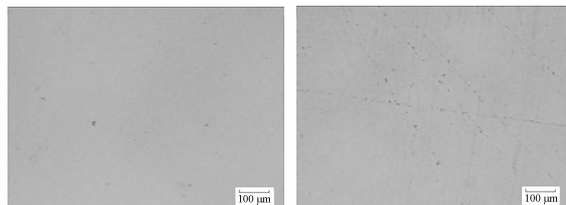
碱对玻璃的水解作用随溶液的 pH 值增大,反应时间的延长,温度的升高而增大^[9];适当提高研抛液的温度可提高六偏磷酸钠的溶解和吸附,促进水晶玻璃发生水解反应,温度升高, OH^- 离子易吸附在水晶玻璃表面,同时使接触表面之间热塑性流动增强,化学反应速度加快,抛光效率提高。

玻璃在纯水中会发生如下反应:



式(4)反应缓慢,虽温度升高有助于反应进行,但变化不显著,因此,去除速率明显低于添加

六偏磷酸钠的情况。因此 SiO₂ 与六偏磷酸钠的化学作用大于与去离子水抛光液间的反应,水晶玻璃在碱性液中化学反应如式(3)所示。



(a) 60 °C 六偏磷酸钠 (b) 60 °C 去离子水

图 3 不同抛光介质下研抛水晶片后的表面形貌

Fig. 3 Surface morphology of wafers after lapping in different slurries

显微镜下(5 倍镜)观察不同研抛液下加工得到的水晶玻璃的表面形貌如图 3 所示。图 3(a)是在 60 °C 六偏磷酸钠研抛液介质加工后得到的表面形貌,表面基本上没有脆性去除形成的凹坑,表面较光滑。图 3(b)是在 60 °C 去离子水研抛液下加工得到的水晶玻璃表面,此时,去离子水对水晶玻璃网路结构的分解反应远不及六偏磷酸钠溶液,软化层厚度较薄得多,研抛垫中的金刚石磨粒切入水晶玻璃基体的深度大都超过其临界切削深度,材料以脆性去除方式为主,因此用去离子水作为研抛液水晶表面的凹坑数量明显增多。

3.2 不同工艺条件下的显微硬度

表 2 为水晶玻璃在六偏磷酸钠介质浸泡一定时间后,快速吹干后直接测得的显微硬度。

表 2 水晶在研抛液中表面硬度与浸泡时间、温度的关系
Tab. 2 Hardness of wafers in different slurries and temperatures

浸泡温度/°C	浸泡时间/min				
	0	5	15	25	35
20	759.78	755.51	737.15	734.80	732.74
40	—	748.23	733.83	728.61	714.31
60	—	723.47	717.39	694.39	686.02

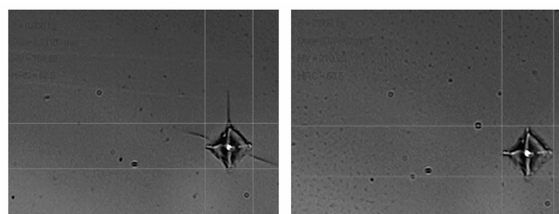
从表 2 可看出水晶玻璃在研抛液中,表层会产生一层比基体硬度低的软化层,且随着浸泡时间的增加,其软化层越软;从 3.1 节可知,反应过程受 OH⁻ 的扩散控制,因此温度影响非常显著。随着温度的提高,扩散活化能增大,水解反应加剧,表层组织变软,硬度下降,因此温度可促进水

晶玻璃表层与研抛液发生水解反应。软化层的硬度可以左右材料的去除速率。

水晶玻璃基体硬度远远超过软化层的硬度,软薄膜的硬度基本可忽略,在薄膜表面进行硬度测试时,若将薄膜去除,基体上的压痕与在无薄膜表面的压痕几乎相同,因此薄软化层厚度可用公式(5)求得^[10]:

$$h = \frac{(D_{av} - D_0)}{7}, \quad (5)$$

式中: h 为水晶玻璃表面变质层厚度; D_{av} 为在抛光液浸泡后的压痕对角线的平均长度; D_0 为初始条件下压痕对角线的长度。不同温度、不同浸泡时间、不同介质下的水晶玻璃表面软化层厚度如表 3 所示。



(a) 20 °C 研抛液浸泡 0 min (b) 60 °C 研抛液浸泡 15 min
(a) After soaking 0 min (b) After soaking 15 min
at 20 °C at 60 °C

图 4 不同条件下试样硬度压痕图

Fig. 4 Hardness indentation of samples in different slurries

图 4(a)、(b)分别为 20 °C 未浸泡于研抛液、于 60 °C 六偏磷酸钠研抛液浸泡 15 min 后所测得的硬度压痕示意图。

表 3 水晶在研抛液中软化层厚度与浸泡时间与温度关系
Tab. 3 Soften thicknesses of wafer in different soak time, temperatures and slurries

浸泡时间 /min	变质层厚度/nm					
	去离子水研抛液			六偏磷酸钠研抛液		
	20 °C	40 °C	60 °C	20 °C	40 °C	60 °C
5	5.42	6.43	8.95	3.43	8.57	26.86
15	5.60	10.29	12.67	17.71	20.29	32.71
25	7.02	15.43	14.24	19.43	23.86	52.43
35	8.81	16.14	14.95	21.68	33.14	58.71

由表 3 可以看出,经去离子水与研抛液浸泡后,水晶玻璃表面会形成一定厚度的软化层,其厚度与浸泡时间和温度有直接关联,软化层厚度随着时间的延长、温度的提高而增大,但增加趋势逐

渐平缓;同种情况下,研抛液浸泡的变质层厚度明显高于去离子水浸泡的厚度,此结果进一步表明六偏磷酸钠研抛液更易与水晶表面间发生水解反应,有助于去除速率的提高。

3.3 抛光过程中的声发射(AE)信号

在研抛中主要的声发射源有以下几类:微划痕引起的裂纹、微滑擦引起的塑性变形、磨屑从基体上脱离和晶粒的微缺陷等,图 5 所示为用六偏磷酸钠作为研抛液研抛水晶机理示意图。

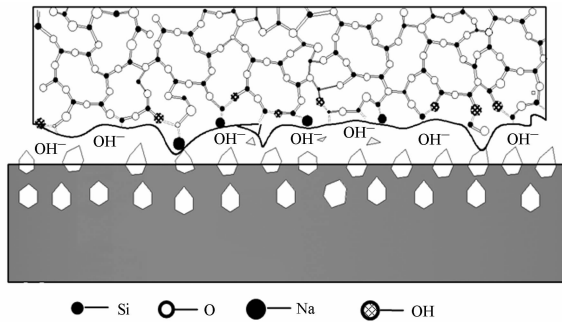


图 5 碱、水晶玻璃与固结磨料抛光垫二维模型示意图
Fig. 5 2D diagram of alkali, decorative glasses and FA-pad

一部分 OH^- 离子与硅原子结合,形成 Si-OH 基团,使 Si-O 键转化为表面的通道由氢键连接,但氢键比离子键要弱,因而使表面区域键强度降低,易形成表面缺陷,同时此通道也有利于表面的互扩散,这些缺陷有可能构成表面的微裂纹,这些缺陷易构成表面的 Griffith 微裂纹^[11]。

声发射(AE)信号呈周期性波动,其振幅大小与抛光垫机械强度有关。当颗粒刻划变质层载荷达到关键点,摩擦力发生急剧变化时,AE 信号会急剧地增加。当剪切力能克服变质层与里层结合力,产生的能量就以声振动的形式释放出。

从图 6 中可看出不同抛光液条件下,声发射信号曲线有很大差别,图 a 曲线较平缓,除图中尖峰处出现明显峰值,采集到的声发射振动信号的峰值最大值约为 1.48 V,此处为瞬时特性声发射信号,表明水晶表面个别处有划痕、损伤,其它部分较连续声发射信号在 1.36 V 上下波动,周期性特征明显。图 b 曲线变化较激烈。这主要是由抛光垫突出金刚石颗粒对水晶表面加工造成软化层在剪切力的作用下发生弹塑性变形而促使软化层材料去除引起的。相比而言,六偏磷酸钠抛光液中获得 AE 曲线要比去离子水抛光液中曲线平缓一些。六

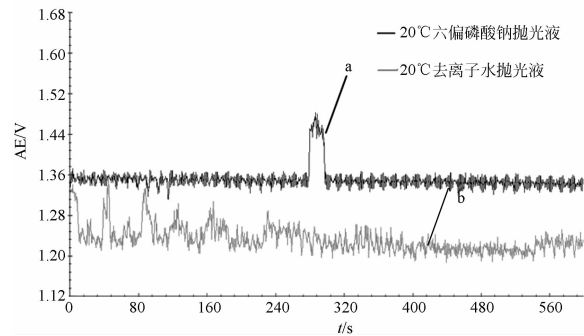


图 6 20 °C 下不同研抛液下的 AE 信号
Fig. 6 AE signals in different slurries at 20 °C temperature

偏磷酸钠与去离子水抛光液相比更易于玻璃网络结构断裂,生成软化层,其硬度低于玻璃里层组织,便于去除,AE 信号较平缓,a 曲线信号强于 b 曲线,主要是由于玻璃在六偏磷酸钠研抛液中,由于表层受到 OH^- 离子的侵蚀而使网络结构的断裂,表面易形成微小裂纹,声发射信号幅值较大。

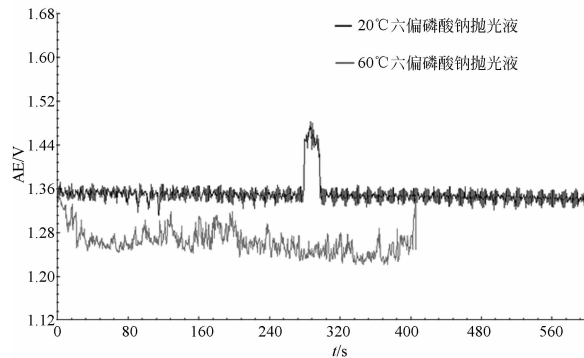


图 7 不同温度下同种研抛液下的 AE 信号
Fig. 7 AE signals in same slurries and different temperatures

随着温度升高,AE 曲线波动振幅越大,说明随着抛光液温度的上升,会促进水晶玻璃表面水

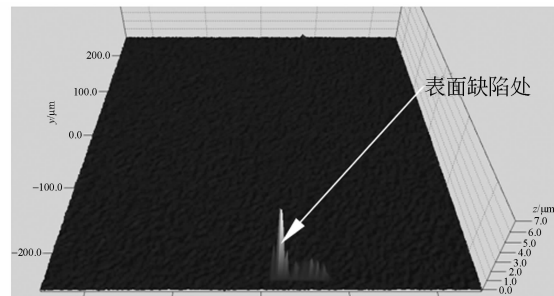


图 8 20 °C 六偏磷酸钠研抛后水晶玻璃三维轮廓形貌
Fig. 8 3D topographic glass after lapping (sodium hexametaphosphate slurry at 20 °C)

解反应,致使晶片表面机械强度减弱,以便于研抛去除。温度升高可提高 MRR 的同时,不利于对水晶样品与晶圆承载器间的表面张力吸附力,在研抛中晶片提前脱落,导致实验终止。

如图 8 所示,是采用 20 °C 六偏磷酸钠研抛液加工后的水晶表面三维形貌,可明显见到突变处,说明表面有少量划痕等类似缺陷,图 6(a) 声发射信号 AE 曲线中尖峰正好吻合。

3.4 抛光过程中的摩擦系数(COF)

在抛光过程中水晶片与抛光垫接触表面测得的摩擦系数数值反应了晶片表面及垫子表面摩擦学特性,可以监测抛光晶片过程。剪切作用使得晶片表面软化层去除,COF 越高,在施加压力一定的情况下,其摩擦力越大,晶片表面软化层厚度一定程度上会影响材料去除所需的剪切力,软化层越厚,去除材料所需的摩擦剪切力越小。

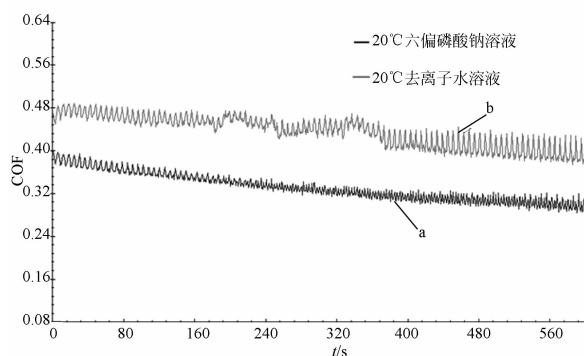


图 9 20 °C 下不同研抛液下的 COF 信号

Fig. 9 COF signals in different slurries at 20 °C

从图 9 中可以看出, a 曲线中抛光垫摩擦系数变化平缓,且逐渐变小表明刚开始是抛光去除率较高,随着时间的增加,去除的材料变少,晶片与抛光垫间的摩擦力降低,去除速率逐渐平缓。六偏磷酸钠作为研抛液,一方面具有一定的亲和作用,易吸附于垫与晶片之间,能在一定程度上降低抛光垫与水晶玻璃表面间的摩擦力,从而便于抛光液以较小的剪切作用力来去除水晶表面变质层;另一方面,六偏磷酸钠研抛液对晶片的化学作用远强于去离子水研抛液的作用,研抛中抛光液化学作用增强,机械作用减弱,摩擦系数减小。比较曲线 a 与 b,曲线 b 摩擦系数高于曲线 a,进一步表明,六偏磷酸钠溶液易与玻璃表面发生化学反应,更易生成软化层。

COF 曲线可评估抛光垫磨损特性,从图中可

推知 20 °C 下的六偏磷酸钠抛光液条件下,抛光垫相对磨损率较低,固结磨料抛光垫使用寿命越长。

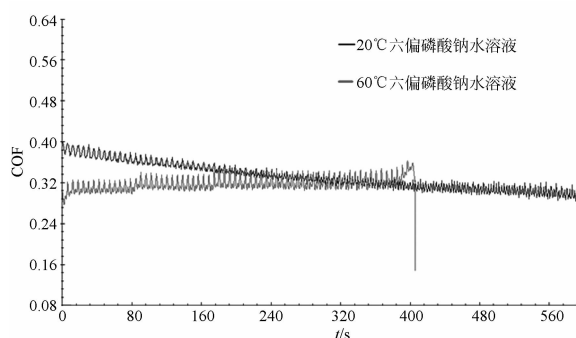


图 10 不同温度下同种研抛液下的 COF 信号

Fig. 10 COE signals in same slurries and different temperatures

研抛液温度升高,一方面可以降低水晶片表面黏弹性,软化表层,降低硬度,从而提高 MRR。温度对 COF 的影响较大,随着温度的升高,抛光垫与水晶晶片间的摩擦系数变小,更进一步说明抛光液温度的提高有利于水晶玻璃表面变质层的形成,变质层的硬度要比基体硬度小些,当抛光液对变质层剪切去除所需的剪切力越小,摩擦系数也随着变小。另一方面温度升高时,可提高研抛中两接触副间分子热运动能力,出现粘滑现象,造成抛光过程不平稳,影响水晶玻璃抛光后表面全局平坦性。

COF 曲线可以反映材料去除速率 MRR 趋势,可区别出不同的抛光液、不同温度对研抛过程的影响规律。

4 结 论

本文采用显微硬度计测量了不同介质条件下水晶表面的变质层厚度。实验结果表明,六偏磷酸钠可促进水晶玻璃表面网络结构断裂,产生软化层,软化层厚度随着浸泡时间、温度升高而增加,进而提高了水晶玻璃的固结磨料化学机械抛光去除率。摩擦系数 COF 曲线变化平缓,声发射 AE 信号波动不明显;六偏磷酸钠研抛液对水晶表面材料去除的化学作用较强,摩擦系数较小,声发射信号平稳且较强;随着研抛时间的延长,摩擦系数亦变小。

参考文献:

- [1] OKIHARU K, TOSHIYUKI E. Ultra-flat and ultra-smooth Cu surfaces produced by abrasive-free chemical-mechanical planarization/polishing using vacuum ultraviolet light [J]. *Precision Engineering*, 2011, 35: 669-676.
- [2] MAKOTO S, TETSUYA K, TORU N. Copper polishing with a polishing pad incorporating abrasive grains and a chelating resin [J]. *Precision Engineering*, 2009, 33: 167-174.
- [3] PANDIJA S, ROY D, BABU S V. Chemical mechanical planarization of copper using abrasive-free solutions of oxalic acid and hydrogen peroxide [J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2007, 102: 144-151.
- [4] 王碧玲,高航,滕晓辑,等. 抛光加工参数对 KDP 晶体材料去除和表面质量的影响 [J]. *人工晶体学报*, 2010, 39(1): 29-43.
WANG B L, GAO H, TENG X J, *et al.*. Effect of polishing parameter on material removal and surface quality of KDP crystal [J]. *Journal of Synthetic Crystals*, 2010, 39 (1): 29-43. (in Chinese)
- [5] ARUN S, NORM G, MICHAEL V, *et al.*. In-stiu tribological properties monitoring and chemical mechanical characterization of planarization process [C]. *Proceedings of 2004 ASME/STLE international joint tribology conference*, 2004.
- [6] SIKDER A K, ASHOK K. Mechanical and tribological properties of interlayer films for the Damascene-Cu chemical-mechanical planarization process [J]. *Journal of Electronic Materials*. 2002, 31 (10): 1016-1021.
- [7] LEE J T, WOO J K, LEE E S. A study on the characteristics of a wafer-polishing process according to machining conditions [J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2009, 10(1): 23-28.
- [8] 徐驰. 基于摩擦力在线测量的化学机械抛光终点检测技术研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2011.
XU CH. *Study on Chemical Mechanical Polishing Endpoint Detection Technology Based on Friction Force Online Measurement* [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2011. (in Chinese)
- [9] 刘玉岭, 李薇薇, 周建伟. 微电子化学技术基础 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
LIU Y L, LI W W, ZHOU J W. *Micron Electric Chemical Technology basis* [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005. (in Chinese)
- [10] 罗虹, 刘家浚, 朱宝亮. 低硬度薄膜厚度的简易检测方法 [J]. *理化检测-物理分册*, 1994, 30(5): 49-50.
LUO H, LIU J J, ZHU B L. A simple detection method of testing the thickness of low hardness film [J]. *Physical Testing and Chemical Analysis Parta Physical Testing: Physical Testing*, 1994, 30(5): 49-50. (in Chinese)
- [11] 王承遇, 陶瑛. 玻璃表面处理技术 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.
WANG C Y, TAO Y. *Technology of glass surface treatment* [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004. (in Chinese)

作者简介:



居志兰(1976—),女,江苏高邮人,博士研究生,副教授,2003年于江苏大学获得硕士学位,主要从事固结磨料抛光垫表面性能表征方面的研究。E-mail: ju_zl@ntu.edu.cn



朱永伟(1967—),男,浙江平湖人,教授,博士生导师,1991年于长沙砂冶研究院获硕士学位,2002年于中南大学获得博士学位,主要从事纳米材料的制备与应用、精密超精密加工、表面工程等方面研究。E-mail: meeywzhu@nuaa.edu.cn



王建彬(1982—),男,安徽临泉人,博士研究生,2008年于安徽工程大学获得硕士学位,主要从事光学元件超精密加工工艺方面的研究。E-mail: wjb1104@163.com



樊吉龙(1987—),男,山东青岛人,硕士研究生,主要从事光学玻璃的超精密加工技术方面的研究。E-mail: fan-jilong678@163.com



李 军(1979—),男,安徽全椒人,博士,副教授,硕士生导师,2007年于中国科学院研究生院获得博士学位,主要从事精密超精密加工、先进光学制造、化学机械抛光等方面的研究。E-mail: junli@nuaa.edu.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)