

乙二醇对固结磨料研磨蓝宝石晶圆的影 响^{*}

王建彬 朱永伟[†] 居志兰 徐俊 左敦稳

(南京航空航天大学 机电学院, 江苏 南京 210016)

摘 要: 研磨液中的化学添加剂对于蓝宝石晶圆的高效超光滑表面加工至关重要. 文中开展了固结磨料研磨蓝宝石晶圆的实验研究, 探索了不同乙二醇含量的研磨液对材料去除速率和表面形貌的影响规律. 采用微/纳米压痕技术和光电子能谱剖析了工件表层的物理化学性能. 结果表明: 当研磨液中含有 5% 的乙二醇时, 工件表面变质层深度约为 3.90 nm, 远优于去离子水研磨液的工件变质层深度(1.04 nm); 乙二醇含量的提高促进了表面变质层的生成, 有利于蓝宝石工件研磨效率的提高和表面质量的改善.

关键词: 固结磨料; 乙二醇; 蓝宝石; 表面变质层; 材料去除速率

中图分类号: TH145.1; TQ174.1; O793 doi: 10.3969/j.issn.1000-565X.2014.11.005

单晶蓝宝石硬度高, 透光性好, 化学性能稳定, 与氮化镓的晶格匹配性高, 是 LED 衬底材料的首选^[1], 也是制作手机面板的理想材料^[2], 市场潜力巨大. 如何高效获得良好的表面质量是单晶蓝宝石应用的关键. 研磨和抛光是蓝宝石晶圆加工的必要工序, 研磨液中的化学添加剂在加工中对材料的去除和表面质量的改善具有重要意义.

Aida 等^[3]使用硫酸和双氧水做调节剂, 研究了不同 pH 值研磨液对蓝宝石抛光效果的影响, 结果表明: 蓝宝石的普雷斯顿方程(Preston)修正系数 K 在碱性条件下较大, 可以获得较高的材料去除率. Xu 等^[4]利用含乙二醇胺和乙二胺等化学添加剂的抛光液抛光蓝宝石, 提高了磨料的分散性, 促进了棱角的钝化, 有助于改善工件表面质量. Zhang 等^[5]采用聚乙二醇做表面活性剂, 有效提高了蓝宝石的抛光效率, 获得了亚微米级的表面质量. 在蓝宝石的抛光过程中, 抛光液的化学作用有助于抛光效率和表面质量的提高, 但抛光效率较低和耗材的浪费

仍是蓝宝石超精密加工的瓶颈.

依靠裸露磨粒的微切削, 固结磨料仅对材料凸起部分加工即可实现全局平面化, 加工效率高且绿色环保, 目前已成为蓝宝石超精密加工的新方向. 美国 3M 公司利用微复制技术开发的金刚石固结磨料研磨垫已成功应用于蓝宝石工件的研磨, 获得了较高的材料去除率^[6]. Gagliardi 等^[7]认为, 固结磨料可以获得更小的表面粗糙度 R_a 和亚表面损伤层. Kim 等^[8]采用金刚石固结磨料双面研磨蓝宝石, 利用研磨液中氧化铝对研磨垫的修正作用, 获得了 $1 \mu\text{m}/\text{min}$ 的材料去除率和亚微米级的表面质量.

乙二醇是陶瓷等材料常用的表面改性添加剂之一^[9-10], 对蓝宝石表面亦有较强的吸附作用^[11], 也是加工中常用的表面活性剂. 因此, 研究乙二醇对固结磨料研磨蓝宝石加工规律的影响具有一定的理论和应用价值.

文中利用笔者所在课题组自制的金刚石固结

收稿日期: 2014-03-28

^{*} 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51175260, 51375237); 南京航空航天大学中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(NP2012516)

作者简介: 王建彬(1982-), 男, 博士生, 安徽工程大学讲师, 主要从事硬脆材料超精密加工技术的研究. E-mail: wjb@ahpu.edu.cn

[†] 通信作者: 朱永伟(1967-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事超精密加工技术研究. E-mail: meeywzhu@nuaa.edu.cn

磨料研磨垫开展了研磨蓝宝石晶圆的实验研究,观察了表面活性剂乙二醇的含量对研磨速率和表面质量的影响,并通过光电子能谱(XPS)和微/纳米压痕实验探索乙二醇对蓝宝石工件表面物理化学性能的影响规律,推断工件表面变化层的深度,以期获得乙二醇在蓝宝石晶圆研磨中的作用机理,指导蓝宝石晶圆的研磨抛光工艺。

1 实验

1.1 研磨加工

实验采用直径为50.8mm、厚度为0.5mm的c向(0001)蓝宝石单晶。研磨液中乙二醇的含量(质量分数,下同)分别为0%、1%、3%、5%,所采用的乙二醇试剂为分析纯。研磨加工在杭州智邦纳米技术有限公司生产的Nanopoli-100型智能型纳米级抛光机上进行。采用W10镀镍金刚石制作的固结磨料研磨垫(FAP),FAP中含有适量的铜粉以提高其硬度。为了保证研磨条件的一致性,研磨加工前先用W50的研磨垫粗磨15min,研磨参数如表1所示。

表1 研磨参数

Table 1 Lapping parameters

参数	工作台转速 ($r \cdot \text{min}^{-1}$)	压力/kPa	偏心距 /mm	研磨液流速 ($\text{mL} \cdot \text{min}^{-1}$)	时间 /min
取值	80	14	45	100	40

1.2 测试和分析方法

研磨后,采用北京本原纳米仪器公司生产的扫描探针原子力显微镜(AFM)测量工件的表面形貌,扫描范围为 $10 \mu\text{m} \times 10 \mu\text{m}$ 。工件的初始厚度由力易得格林利工具(上海)有限公司生产的E0571型数显千分尺(分辨率0.01mm)测得,工件加工前后的质量由德国赛多利斯集团生产的BS224S型精密天平(精确度220g/0.1mg)计量,并利用公式(1)计算研磨加工的材料去除速率MRR。为保证实验结果的可重复性,MRR(nm/min)取5次实验结果的平均值。

$$\text{MRR} = \frac{(m_0 - m)h}{m_0 t} \times 10^6 \quad (1)$$

式中: m_0 和 m 分别为工件加工前后的质量,g; h 为工件加工前的初始厚度,mm; t 为研磨时间,min。

研磨过程中,工件表面硬度和弹性模量等力学性能的变化可反映研磨液的化学去除作用及其程度。工件表面力学性能指标用瑞士CSM公司生产的CPX+NHT+MST微/纳米压痕仪测定,采用Berkovich

三棱锥金刚石压头,位移分辨率 $\leq 0.004 \text{ nm}$ 。线性加载,最大载荷10mN,加载速率20mN/min,卸载速率20mN/min,保压时间10s。为了保证压痕实验的准确性,每个工件上的压痕重复5次,压痕间距 $10 \mu\text{m}$;为确保压痕的独立性,取压痕平均值作为测试结果。

采用美国Thermo公司生产的ESCALAB 250Xi型X射线衍射仪分析不同乙二醇含量的研磨液对蓝宝石工件表面化学组分的影响。分别用不含乙二醇和含5%乙二醇的研磨液浸泡工件,并对浸泡后的研磨工件进行深度剖析,对比分析能谱变化,推断变质层深度。测试条件如下:Al靶 K_{α} 射线为激发源(1486.6eV),发射功率200W,真空度优于 $1.0 \times 10^{-8} \text{ Pa}$,刻蚀电流 $2 \mu\text{A}$,刻蚀面积 $2.5 \text{ mm} \times 2.5 \text{ mm}$,刻蚀速率 0.13 nm/s ,以污染碳C1s(284.6eV)作为元素结合能的参考内标。

2 结果与分析

2.1 材料去除速率

不同乙二醇含量的研磨液对蓝宝石工件的去除速率见图1。在其他工艺参数相同的情况下,不含乙二醇研磨液的材料去除速率为 $114 \text{ nm}/\text{min}$,明显低于含乙二醇的研磨液。另外,随着研磨液中乙二醇含量的增加,蓝宝石工件的材料去除率小幅增加,含5%乙二醇研磨液的材料去除速率最高,为 $141 \text{ nm}/\text{min}$ 。

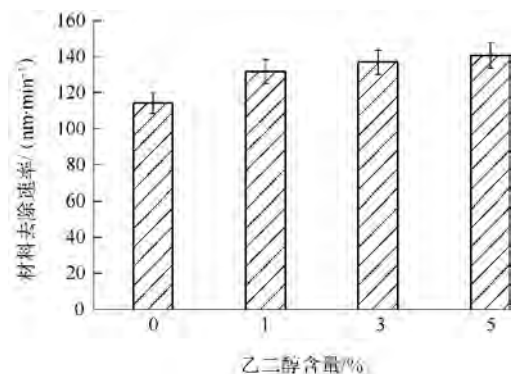


图1 乙二醇含量对材料去除速率的影响

Fig. 1 Effect of ethylene glycol content on removal rate of the material

在蓝宝石的研磨过程中,研磨液在完成排屑的同时,促进了工件表面机械化学特性的改变,有利于蓝宝石工件研磨效率的提高和质量的改善。蓝宝石工件在去离子水中研磨时,其表面约有1nm左右的水合软化层厚度^[12]。硬度较小的软化层在金刚石

磨料作用下被快速去除,露出新鲜表面,这有利于材料的去除.当研磨液中含有乙二醇时,乙二醇促进了蓝宝石工件表面软化层的生成^[13].随着乙二醇含量的增加,软化层的生成速率提高,工件表面软化层深度增加,有利于材料去除速率的增大.同时,乙二醇对 FAP 中铜的腐蚀也在增加,使 FAP 表面的部分铜消失,少量的金刚石磨粒因把持力减小而脱落,随研磨液流失,留下凹坑,影响下层金刚石出露,故一定程度上降低了金刚石的出露高度,致使材料去除速率的增幅放缓.

2.2 表面力学性能分析

蓝宝石工件表面软化层的生成是其机械化学性能发生改变的直接诱因.表面软化层机械性能的改变在硬度和弹性模量中得到体现.图 2 为不同乙二醇含量的研磨液加工后的微/纳米压痕载荷-深度曲线.经不同乙二醇含量的研磨液加工后的蓝宝石工件的加载曲线基本重合,卸载曲线也基本重合,且加载曲线较平滑,仅在压痕深度 42~50 nm 处对应的曲线斜率突然变小,即在此压痕深度范围

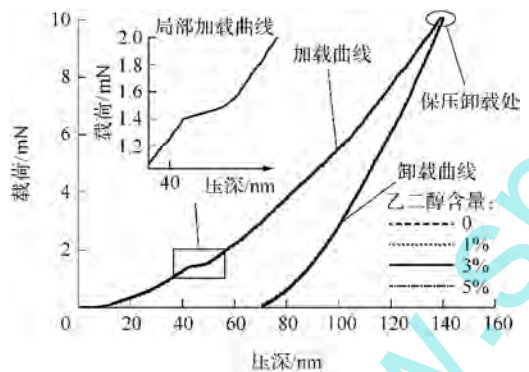
内,载荷的变化相对较小,可能出现了位移突变 (Pop-in) 现象^[14-15],说明蓝宝石工件可能存在弹塑性转变的过程^[16-17].在 10 mN 载荷下,不同工件的位移突变位置基本相同,说明研磨液中的乙二醇对蓝宝石工件表面机械性能的影响不十分显著.

为了进一步分析乙二醇对蓝宝石工件表面机械性能的影响,将图 2(a) 中的保压卸载处放大,如图 2(b) 所示.结合表 2 可以发现:随着乙二醇含量的增大,相同载荷下工件表面的压痕深度增大,硬度和弹性模量则减小;当研磨液中乙二醇含量从 0 增加到 1% 时,压痕深度增加 3.674 nm;随着乙二醇含量的进一步增大,压痕深度的增幅明显变小;工件表面硬度和弹性模量的变化呈现相似的趋势——加入乙二醇后出现相对较大的降幅,乙二醇含量进一步增大后,降幅明显减小.以上结果说明,乙二醇对工件表面机械性能有一定程度的影响.

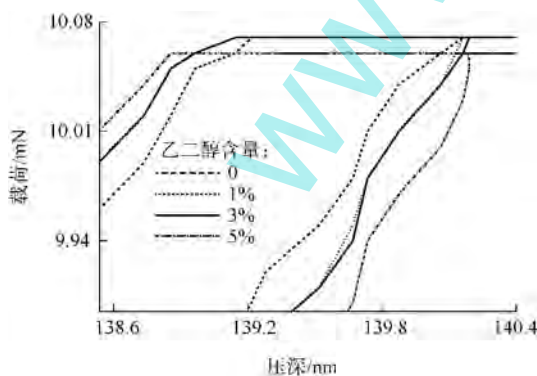
表 2 不同乙二醇含量下研磨蓝宝石的力学性能

Table 2 Mechanical performance of sapphire at different ethylene glycol contents

乙二醇含量/%	压痕深度/nm	硬度(Hv)	弹性模量/GPa
0	140.191	4144.300	529.183
1	143.865	3836.576	514.344
3	144.539	3801.080	511.642
5	145.629	3703.689	494.488



(a) 完整曲线



(b) 保压卸载处放大图

图 2 不同乙二醇含量下研磨蓝宝石的微/纳米压痕载荷-压痕深度曲线

Fig. 2 Micro/nano-sized indentation load-depth curves of sapphire at different ethylene glycol contents

蓝宝石工件研磨后的表面位错缺陷层不同于材料本身的结构特性,其深度是磨粒和研磨液的机械化学综合作用的结果.在机械作用相同的情况下,工件表层力学性能的差异可以认为主要是化学作用的体现.当研磨液中含乙二醇时,由于其含有两个羟基(-OH),且化学性质活泼,易发生脱水氧化反应.研磨液中的 OH^- 离子增加,并与蓝宝石工件表面的 Al^{3+} 离子发生吸附反应,生成不同于基体的新物质,使工件表面的力学性能发生改变^[11,18].随着乙二醇含量的增加,研磨液中的 OH^- 离子数量也增多,研磨液对蓝宝石工件表面的化学吸附作用增强,但由于工件表面缺陷层主要受磨粒机械作用影响,其表层的位错缺陷面积基本恒定,先期由于化学吸附作用生成的新物质覆盖在工件表层,一定程度上减缓了工件表面与研磨液化学吸附作用的发生,故随着乙二醇含量的增大,其对工件表层力学性能的影响程度减弱.

2.3 表层化学性能分析

为了进一步探知研磨液中乙二醇对蓝宝石工

件的化学作用,分别对在不含乙二醇和含5%乙二醇的研磨液中浸泡40 min的蓝宝石工件进行XPS深度剖析.图3为使用两种乙二醇含量研磨液浸泡

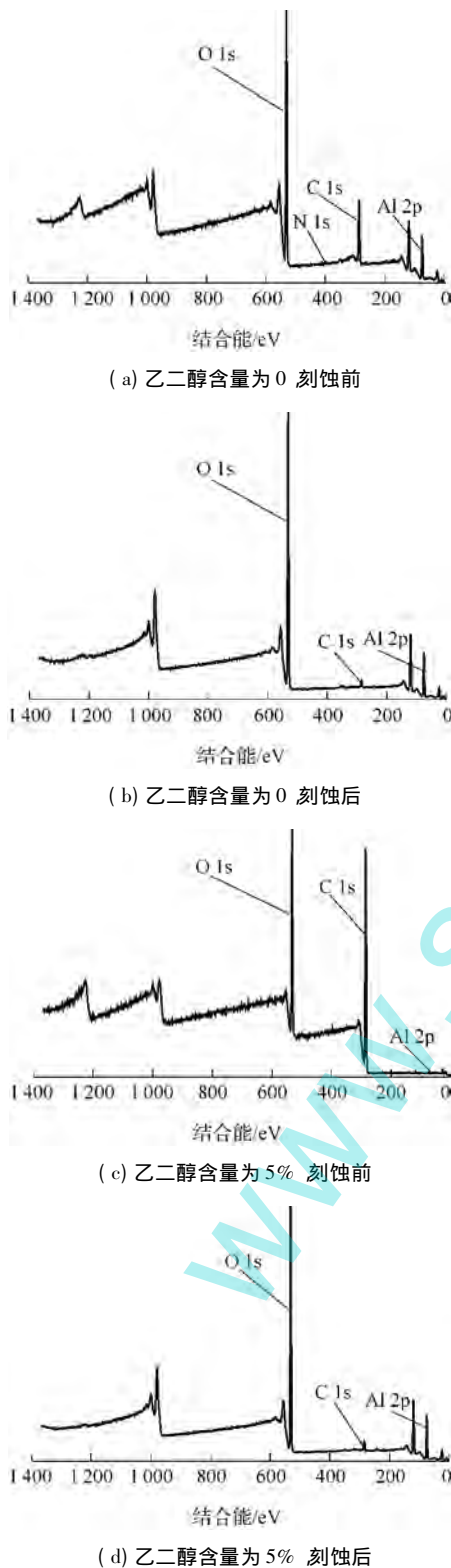


图3 不同研磨液浸泡蓝宝石刻蚀前后的XPS宽扫图谱
Fig. 3 XPS full-scan spectra of soaking sapphire before and after the sputtering with different slurry

的工件在氩离子刻蚀前后的宽扫图谱.刻蚀时间分别为15 s和35 s.从图中可看出:不含乙二醇的研磨液浸泡的工件的XPS谱中,刻蚀前主要存在O 1s峰、C 1s峰、Al 2p峰和N 1s峰.刻蚀后N 1s峰消失,C 1s峰强度下降,O 1s和Al 2p峰强度上升,说明刻蚀前后工件表面的Al和C元素可能以氧化物的形式存在.N 1s峰的存在可能是研磨过程中工件表面受到空气中氮化物的污染所致.含5%乙二醇的研磨液浸泡的工件刻蚀前后的XPS谱中主要存在O 1s峰、C 1s峰和Al 2p峰,其中最强的为O 1s峰.刻蚀前后C 1s峰强度明显下降,Al 2p峰强度显著上升,说明工件刻蚀前表面吸附了较多的乙二醇.刻蚀到基体后仍有少量C元素存在,可能是因刻蚀过程中表面位错缺陷层残存乙二醇对新鲜刻蚀表面的渗透所致.

表3为工件刻蚀前后的元素含量,可以看出,不含乙二醇研磨液浸泡的蓝宝石工件刻蚀8 s、刻蚀深度达1.04 nm(估算)后,C 1s的含量基本不变,Al元素和O元素的含量接近2:3,故可认为已刻蚀到基体.因此,仅含去离子水的研磨液对蓝宝石表层软化变质的深度约为1.04 nm(估算),这与Zhu等^[12]的研究结果基本一致.而含5%乙二醇研磨液浸泡的工件在刻蚀30 s后,C 1s的含量基本恒定,刻蚀深度达3.90 nm(估算).可见含有乙二醇的研磨液能够有效促进蓝宝石表面变质层的生成.

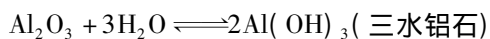
表3 蓝宝石刻蚀前后的元素含量

Table 3 Element contents of sapphire before and after the sputtering

乙二醇含量 /%	刻蚀时间 /s	元素含量 /%			
		O 1s	Al 2p	C 1s	N 1s
0	0	33.54	20.87	43.54	2.04
	8	54.43	40.84	4.74	—
	15	54.44	40.87	4.69	—
5	0	23.61	1.30	75.09	—
	20	49.73	37.76	12.51	—
	30	52.72	40.76	6.51	—
	35	52.81	41.10	6.08	—

当研磨液中含乙二醇时,其分子中的醚氧基团因带电子而易与蓝宝石工件表面活性较强的 Al^{3+} 离子结合,吸附在工件表面,使研磨液中较多的羟基与 Al^{3+} 离子结合形成新的配位键,促进了蓝宝石表面水合反应的发生,生成了不同于基体的新物

质. 表面新物质的生成改变了工件表层的物理化学性能, 有利于研磨效率的提升^[18-20]. 蓝宝石工件表面在含有乙二醇的碱性研磨液中可能发生的化学反应如下所示^[12]:



$\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons 2\text{AlO}(\text{OH})$ (硬水铝石或者软水铝石)

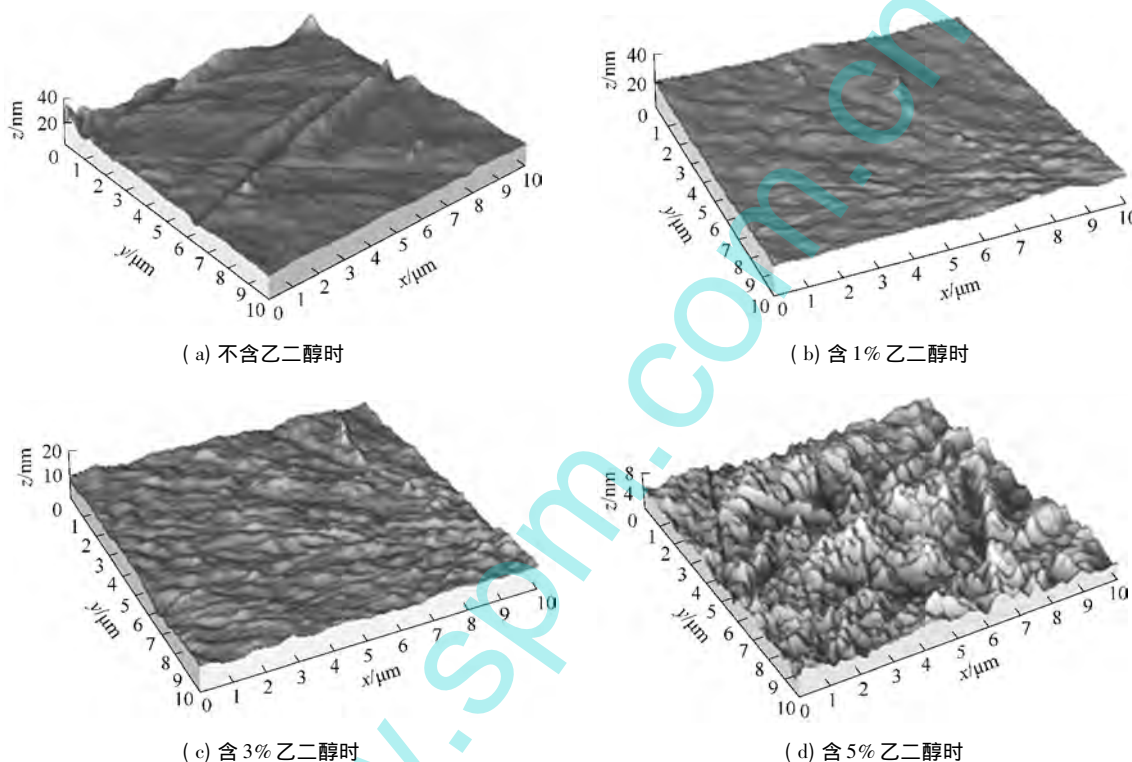
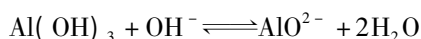


图 4 不同乙二醇含量下研磨蓝宝石所得表面形貌

Fig. 4 Surface topography of sapphire lapped at different ethylene glycol contents

固结磨料研磨蓝宝石工件过程中, 研磨液中仅为去离子水时, 由于工件表面的水合化学作用较为微弱, 主要借助于硬度较大的出露金刚石棱角对工件表面进行滑擦, 造成工件表面较深的划痕. 当研磨液中含有乙二醇时, 溶液中较多的羟基电离增加了 OH^- 的含量, 并与蓝宝石表面的 Al_2O_3 发生化学反应, 生成硬度较小的水铝石^[12-20]; 同时, 活性较强的乙二醇对 FAP 中铜粉的腐蚀和络合作用会造成磨粒出露高度的少量下降, 一定程度上减小了其对工件的刮擦效果. 随着乙二醇含量的增加, 其对蓝宝石工件表面的化学作用增强, 工件的研磨效率和表面质量得以提高.

2.4 表面形貌分析

图 4 为不同含量乙二醇研磨液研磨后工件的 AFM 表面形貌. 不含乙二醇的研磨液研磨的蓝宝石工件表面有较深的划痕, 平均粗糙度 (S_a , 下同) 为 24.60 nm. 随着乙二醇含量的增加, 工件表面的划痕深度逐渐减小, 表面高低起伏的状态得到较大的改善, 其对应的平均粗糙度分别为 10.80、9.02 和 7.64 nm. 可见, 乙二醇能够有效降低蓝宝石工件的表面粗糙度, 获得较好的表面质量.

3 结论

文中通过对固结磨料研磨蓝宝石圆晶的实验研究, 得出以下结论:

(1) 采用 W10 镀镍金刚石固结磨料研磨垫, 在去离子水中研磨蓝宝石工件可以获得 114 nm/min 的材料去除速率和平均粗糙度 S_a 为 24.60 nm 的表面质量. 研磨液中加入 5% 的乙二醇后, 研磨速率提高到 141 nm/min, 平均粗糙度 S_a 下降到 7.64 nm.

(2) 在固结磨料研磨蓝宝石的过程中, 乙二醇加剧了研磨液对工件表面的化学去除作用, 有助于提高蓝宝石工件的去除速率. 乙二醇含量的增加降低了磨

粒的出露高度,有利于获得较好的表面质量。

(3) 研磨液中乙二醇电离出的羟基与工件表面的活性阳离子形成新的配位键,生成硬度低于基体材料的软化层。当研磨液仅为去离子水时,蓝宝石工件表面变质层深度约为 1.04 nm;而当研磨液中含有 5% 的乙二醇时,工件表层的变质深度约达 3.90 nm。

参考文献:

- [1] Akselrod M S, Bruni F J. Modern trends in crystal growth and new applications of sapphire [J]. *Journal of Crystal Growth* 2012, 360: 134-145.
- [2] Porras P, Saidi H, Yegneswaran V. An analysis of the iPhone botnet [M] // Schmidt A U, Russello G, Lioy A, et al. ed. Security and privacy in mobile information and communication systems. Heidelberg: Springer 2010: 141-152.
- [3] Aida H, Doi T, Takeda H, et al. Ultraprecision CMP for sapphire, GaN and SiC for advanced optoelectronics materials [J]. *Current Applied Physics* 2012, 12(S2): S41-S46.
- [4] Xu W, Lu X, Pan G, et al. Effects of the ultrasonic flexural vibration on the interaction between the abrasive particles; pad and sapphire substrate during chemical mechanical polishing (CMP) [J]. *Applied Surface Science*, 2011, 257(7): 2905-2911.
- [5] Zhang Z, Liu W, Song Z, et al. Two-step chemical mechanical polishing of sapphire substrate [J]. *Journal of the Electrochemical Society* 2010, 157(6): H688-H691.
- [6] Fletcher T D, Gobena F T, Romero V D. Diamond fixed abrasive lapping of brittle substrates [C] // The 18th ASEMEP National Technical Symposium. New York: Optical Society of America 2004: 283-285.
- [7] Gagliardi J J, Kim D, Sokol J J, et al. A case for 2-body material removal in prime LED sapphire substrate lapping and polishing [J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2013, 15(3): 348-354.
- [8] Kim H M, Manivannan R, Moon D J, et al. Evaluation of double sided lapping using a fixed abrasive pad for sapphire substrates [J]. *Wear* 2013, 302(1): 1340-1344.
- [9] Nie F Q, Xu Z K, Huang X J, et al. Acrylonitrile-based copolymer membranes containing reactive groups: surface modification by the immobilization of poly(ethylene glycol) for improving antifouling property and biocompatibility [J]. *Langmuir* 2003, 19(23): 9889-9895.
- [10] Meng S, Yue Z, Li L. Effect of ethylene glycol on the orientation and magnetic properties of barium ferrite thin films derived by chemical solution deposition [J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 2014, 354: 290-294.
- [11] Li N, Thoms R K, Rennie A R. Adsorption of non-ionic surfactants to the sapphire/solution interface-effects of temperature and Ph [J]. *Journal of Colloid and Interface Science* 2012, 369(1): 287-293.
- [12] Zhu H, Niesz D E, Greenhut V A, et al. The effect of abrasive hardness on the chemical-assisted polishing of (0001) plane sapphire [J]. *Journal of Materials Research* 2005, 20(2): 504-520.
- [13] 王建彬, 朱永伟, 谢春祥, 等. 固结磨料研磨蓝宝石单晶过程中研磨液的作用 [J]. *光学精密工程* 2014, 22(11): 3004-3011.
Wang Jian-bin, Zhu Yong-wei, Xie Chun-xiang, et al. Role of slurry in single crystal sapphire lapping with fixed abrasive pad [J]. *Editorial Office of Optics and Precision Engineering* 2014, 22(11): 3004-3011.
- [14] Mao W G, Shen Y G, Lu C. Deformation behavior and mechanical properties of polycrystalline and single crystal alumina during nanoindentation [J]. *Scripta Materialia* 2011, 65(2): 127-130.
- [15] 柯瑞, 张宇民, 周玉峰. c 向蓝宝石单晶纳米压痕尺度效应研究 [J]. *人工晶体学报* 2013, 42(10): 1978-1982.
Ke Rui, Zhang Yu-min, Zhou Yu-feng. Study on nano-indentation size effect on c plane of sapphire single crystal [J]. *Journal of Synthetic Crystals* 2013, 42(10): 1978-1982.
- [16] Lin Y H, Chen T C, Yang P F, et al. Atomic-level simulations of nanoindentation-induced phase transformation in mono-crystalline silicon [J]. *Applied Surface Science* 2007, 254(5): 1415-1422.
- [17] 鲁春朋, 高航, 滕晓辑, 等. 磷酸二氢钾单晶体纳米压痕的力学行为 [J]. *机械工程学报*, 2010, 46(17): 192-198.
Lu Chun-peng, Gao Hang, Teng Xiao-ji, et al. Mechanical response of KDP single crystal using nano-indentation technique [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2010, 46(17): 192-198.
- [18] Jiang H, Cao Z, Yang R, et al. Synthesis and characterization of spinel MgAl₂O₄ thin film as sapphire optical fiber cladding for high temperature applications [J]. *Thin Solid Films* 2013, 539: 81-87.
- [19] Papparazzo E. XPS, AES and EELS studies of Al surfaces [J]. *Vacuum* 2001, 62(1): 47-60.
- [20] Klopogge J T, Duong L V, Wood B J, et al. XPS study of the major minerals in bauxite: gibbsite, bayerite and (pseudo-) boehmite [J]. *Journal of Colloid and Interface Science* 2006, 296(2): 572-576.

(下转第 39 页)

Sensor Fault Detection and Isolation for an Electro-Hydraulic Servo System Based on Robust Observer

Xu Qiao-ning¹ Yu Feng² Zhou Hua¹ Yang Hua-yong¹

(1. State Key Laboratory of Fluid Power Transmission and Control, Zhejiang University, Hangzhou 310027, Zhejiang, China; 2. Jiujiang Branch of 707 Institute of China Shipbuilding Industry Corporation (CSIC), Jiujiang 332007, Jiangxi, China)

Abstract: In the electro-hydraulic servo system, extra sensors are often added for fault detection and isolation (FDI), but the sensor fault can cause a false alarm. The electro-hydraulic servo system itself is a typical nonlinear system and is often subjected to time-varying and unknown disturbances, which brings about great challenges to the sensor FDI. In order to solve these problems, a FDI scheme based on a nonlinear robust observer is proposed. In this scheme, the robust observer is used to handle the system nonlinearity as well as unknown disturbances and a linear matrix inequality method is adopted to facilitate the observer design. For the sensor fault isolation, a batch of robust observers is designed and some logic rules are made. Then, the proposed FDI scheme is verified by simulations and experiments, and an adaptive threshold is designed to make decision according to the characteristics of experimental data. Both simulation and experimental results show that the proposed FDI scheme is effective.

Key words: electro-hydraulic servo system; fault detection; fault isolation; robust observer; adaptive threshold

(上接第 30 页)

Effect of Ethylene Glycol on Lapping of Sapphire Wafer by Using Fixed Abrasive Pad

Wang Jian-bin Zhu Yong-wei Ju Zhi-lan Xu Jun Zuo Dun-ven

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, Jiangsu, China)

Abstract: The chemical additives in lapping slurry play a vital role in the efficient ultra-smooth machining of sapphire wafer. In the investigation, the lapping experiment of sapphire wafer was performed by using a fixed abrasive pad, and the effects of the ethylene glycol concentration in lapping slurry on the material removal rate (MRR) and surface morphology of sapphire wafer were discussed. Then, the micro/nano-indentation technique and the photoelectron spectroscopy (XPS) were employed to analyze the physical and chemical properties of lapped wafer surface. The results indicate that (1) when the lapping slurry contains 5% ethylene glycol, the depth of surface-modified layer on the lapped wafer surface is about 3.90 nm, and is superior to that in the deionized water, which is 1.04 nm; and (2) higher ethylene glycol content can promote the surface-modified layer to form, which helps to improve the lapping efficiency and enhance the surface quality.

Key words: fixed abrasive; ethylene glycol; sapphire; surface-modified layer; material removal rate