

文章编号 1004-924X(2017)12-3070-09

## 碳化硼研磨后蓝宝石晶体的亚表面损伤

谢 春<sup>1\*</sup>, 汪家林<sup>2</sup>, 唐慧丽<sup>3</sup>

- (1. 同济大学 中德工程学院, 上海 201804;
2. 同济大学 机械与能源工程学院, 上海 201804;
3. 同济大学 物理科学与工程学院, 上海 200092)

**摘要:**介绍了蓝宝石材料的亚表面损伤形成机制。考虑碳化硼磨料可产生较小亚表面损伤的优点,本文基于游离磨料研磨方式,研究了不同粒度碳化硼磨料研磨后蓝宝石晶体的亚表面损伤。利用 KOH 化学腐蚀处理技术,对研磨后的样品进行了刻蚀;通过特定的腐蚀坑图像间接反映了蓝宝石晶体的亚表面损伤形貌特征,获得了 W20、W10 和 W5 碳化硼磨料产生的亚表面损伤深度,得到了在不同刻蚀时间下蓝宝石亚表面损伤形貌、表面粗糙度和刻蚀速率。研究结果显示:游离碳化硼磨料研磨造成的蓝宝石晶体的亚表面损伤密度相当显著,但损伤深度并不大,其随磨料粒度的增大而增大,W20、W10 和 W5 粒度的磨料研磨后产生的亚表面损伤深度分别为 7.4, 4.1 和 2.9  $\mu\text{m}$ ,约为磨料粒度的 1/2。得到的结果表明采用碳化硼磨料研磨有利于获得低亚表面损伤的蓝宝石晶片,而采用由大到小的磨料逐次研磨可以快速获得低亚表面损伤的蓝宝石晶片。

**关键词:**蓝宝石晶体;亚表面损伤;游离碳化硼磨料;KOH 化学腐蚀;表面粗糙度

**中图分类号:** TN305.2 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20172512.3070

## Subsurface damage of sapphire crystal after lapping with boron carbide abrasives

XIE Chun<sup>1\*</sup>, WANG Jia-lin<sup>2</sup>, TANG Hui-li<sup>3</sup>

- (1. Sino-German College of Applied Sciences, Tongji University, Shanghai 201804, China;
  2. College of Mechanical Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China;
  3. College of Physics Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)
- \* Corresponding author, E-mail: XC0522@tongji.edu.cn

**Abstract:** The formation mechanism of subsurface damage of sapphire materials was introduced. In consideration of the boron carbide abrasives with advantage of smaller subsurface damage, the subsurface damage of a sapphire crystal after lapping by boron carbide abrasives with different particle sizes was studied based on the loose abrasive lapping method. The lapped sapphire wafer was etched by KOH chemical corrosion processing technology, the subsurface damage morphology of the sapphire crystal was indirectly reflected by specific etch pit image and the subsurface damage depths were achieved with gritparticle sizes W20, W10 and W5 by loose boron carbide abrasive lapping. The sub-

收稿日期:2017-08-09;修订日期:2017-09-14.

基金项目: 国家自然科学基金创新研究群体项目(No. 61621001); 国家重点研发计划资助项目(No. 2016YFA0401304)

surface damage morphology, surface roughness and etching rate of the sapphire crystal at different etching time were obtained also. The results show that the subsurface damage density of sapphire crystal lapped by loose boron carbide abrasive is remarkable, but the damage depth is lower, and it increases with of the abrasive sizes. After lapping by looseboron carbide abrasives with gritparticle sizes of W20, W10 and W5, the depths of subsurface damage are 7.4, 4.1 and 2.9  $\mu\text{m}$ , respectively, which is about 1/2 of the size of abrasive. It indicates that the lapping method with boron carbide abrasives is beneficial to the reduction of subsurface damage of the sapphire. In addition, the sapphire wafer with low subsurface damage can be achieved quickly by lapping methods with abrasive particle sizes from larger to smaller.

**Key words:** sapphire crystal; subsurface damage; loose boron carbide abrasive; KOH chemical corrosion; surface roughness

## 1 引 言

蓝宝石晶体的化学成分为  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , 莫氏硬度达 9.0, 具有优异的力、热、光、电和化学稳定等特性, 因此广泛应用于紫外到红外光谱区的光学窗口元件、微电子电路绝缘基底、LED 芯片衬底、激光基质材料、精密仪器仪表、陀螺、卫星以及火箭导弹上的光学屏蔽罩等<sup>[1-2]</sup>。蓝宝石研磨加工的主要目的是去除蓝宝石切片过程产生的表面切痕、凹凸不平损伤层, 提高晶片平整度, 并降低表面粗糙度, 达到预抛光要求<sup>[3]</sup>。超光滑和近无损层的蓝宝石基底是生长高质量半导体薄膜的基础<sup>[4-5]</sup>, 为了得到这样的基底, 需要深入研究其加工过程, 尤其是研磨过程产生亚表面层的规律。作为典型的硬脆性材料, 在研磨过程中, 蓝宝石晶体不可避免地产生表面缺陷和亚表面损伤, 亚表面损伤深度与研磨工艺参数间的规律是确定每道研磨工序去除量的重要参考依据, 因此亚表面损伤层深度分布的准确预测和抑制已成为获得高质量蓝宝石晶片的关键技术之一<sup>[6]</sup>。目前, 硅和光学玻璃的亚表面损伤理论和实验研究已有很多<sup>[7-11]</sup>, 现有的蓝宝石亚表面损伤研究主要集中于损伤深度、测量方法等。尹中伟等<sup>[12]</sup>采用 ABAQUS 软件数值模拟研究了蓝宝石单晶的裂纹扩展问题, 得出蓝宝石的裂纹扩展符合脆性材料裂纹变化的规律, 即裂纹突然开裂后迅速扩展至断裂失效。Kumar 等<sup>[13]</sup>采用平均粒度为 1  $\mu\text{m}$  的游离金刚石微粉研磨蓝宝石基底, 利用低温浓硫酸湿法刻蚀方法测得亚表面损伤层深度为 3.8  $\mu\text{m}$ , 从而推测蓝宝石的亚表面损伤深度是磨粒尺

寸的 3~5 倍。朱永伟等<sup>[14]</sup>采用差动 KOH 腐蚀法, 对比研究了粒度分别为 W50 和 W14 金刚石游离和固结磨料研磨后蓝宝石的亚表面损伤深度, 发现固结磨料研磨能显著降低亚表面损伤深度。刘道标等<sup>[15]</sup>采用 320# 碳化硼游离磨料双面研磨了蓝宝石晶体, 利用双片式角度抛光法测得蓝宝石单面的亚表面损伤深度为 15  $\mu\text{m}$ 。张志斌等<sup>[16]</sup>采用 360# 碳化硅游离磨料双面精磨了蓝宝石晶体, 采用聚焦离子束术并结合 SEM 观测了蓝宝石的亚表面裂纹形态, 得出亚表面损伤深度为 2.2  $\mu\text{m}$ 。上述研究表明, 蓝宝石晶体的亚表面损伤深度与研磨方式以及工艺参数等关系密切。

游离磨料研磨是一种传统的研磨加工方法, 其加工设备简单、可操作性强。与常规研磨蓝宝石晶体的金刚石磨料相比, 碳化硼磨料具有硬度略低、价格便宜、磨削能力稍弱, 且研磨后晶体表面划伤的概率较小的特点, 因此, 采用碳化硼磨料进行蓝宝石晶体研磨有利于获得较小的亚表面损伤。本文首先介绍了蓝宝石等脆性材料亚表面损伤的形成机制, 然后进行不同粒度的碳化硼游离磨料的蓝宝石双面研磨实验, 再结合 KOH 化学腐蚀技术和光学显微镜, 通过特定的腐蚀坑图像间接地反映了蓝宝石晶体研磨后的亚表面损伤形貌特征, 研究了腐蚀后蓝宝石表面粗糙度、刻蚀速率随刻蚀时间的演变规律, 获得了 W20、W10、W5 牌号的碳化硼磨料产生的亚表面损伤深度规律, 这对于确定每道研磨工序的去除量, 节省加工时间具有重要的指导意义。对比文献<sup>[13]</sup>的结论发现, 碳化硼磨料在减小蓝宝石亚表面损伤深度方面较金刚石磨料有明显优势, 这成为优化蓝宝石研磨工艺以及减小亚表面损伤深度的重要实验

依据,为实现低损伤超光滑表面的蓝宝石基底提供了重要的基础条件。

## 2 蓝宝石亚表面损伤的形成机制

蓝宝石晶体具有硬度高、脆性大、化学性质稳定等不利于加工的特点。在其研磨过程中,除了研磨液的化学作用导致的腐蚀坑、腐蚀纹理等表面损伤外,在机械作用下还存在两种材料去除模式:(1)延性去除,包括两体延性去除和三体延性去除;(2)脆性去除,包括两体脆性断裂去除和三体脆性断裂去除<sup>[17-18]</sup>,如图 1 所示。延性去除模式下,磨粒的磨削深度小于蓝宝石的临界切削深度,材料以塑性方式去除,几乎没有凹坑、裂纹现象产生,是一种缺陷较小的材料去除方式。脆性去除模式下,单个磨粒在压力和速度作用下压入蓝宝石晶体表面,当压应力超过其断裂强度时,表面会产生横向及径向裂纹。前者扩展至表面层,导致蓝宝石表层破碎,形成凹坑、划痕,造成表面缺陷;后者向深层扩展导致微观裂纹、位错,造成亚表面损伤。

亚表面损伤层深度一般指径向裂纹层深度。Lambropoulos<sup>[19]</sup>基于压痕断裂力学理论推导出径向裂纹深度  $c$  的计算公式为:

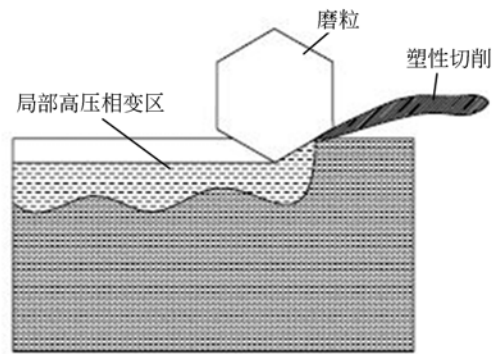
$$c = \alpha_K \frac{2}{3} \left[ \frac{E}{H} \right]^{\frac{2(1-m)}{3}} (\cot \phi)^{\frac{4}{9}} \left[ \frac{F}{K_{IC}} \right]^{\frac{2}{3}}, \quad (1)$$

其中: $F$ 为压痕压制载荷; $\phi$ 为压头锐度角; $E$ 为试件弹性模量; $H$ 为试件硬度; $K_{IC}$ 为试件断裂韧性; $\frac{1}{3} < m < \frac{1}{2}$ ;  $\alpha_K = 0.027 + 0.09(m - \frac{1}{3})$ 。可见,试件的亚表面损伤深度与材料本身的力学性能、外载荷、磨粒粒度、形状等有直接关系。

## 3 实验

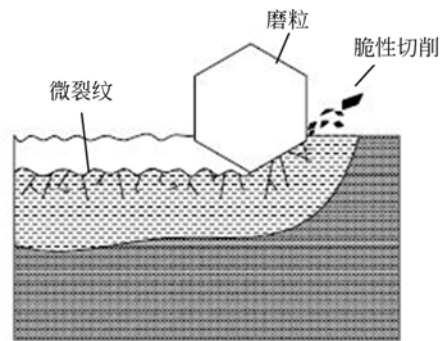
### 3.1 试件制备

主要的实验设备及参数如表 1 所示。蓝宝石样品的直径为 53.9 mm,厚度为 2 mm,晶向 C 向(0001)的切割薄片,研磨沿用传统的游离磨料研磨方式,研磨设备采用型号为 JM030.2 的双轴精密精磨抛光机,研磨盘采用球墨铸铁研磨盘,研磨液自制,磨料采用不同粒度的碳化硼微粉,浓度为



(a) 延性去除

(a) Ductile removal



(b) 脆性去除

(b) Brittle removal

图 1 蓝宝石的材料去除模型

Fig. 1 Material removal model of sapphire

15%,悬浮剂采用进口磨料分散剂,表面活性剂采用乙二醇,机械搅拌后进行超声分散,研磨液采用自动滴料方式。

表 1 蓝宝石研磨实验设备及参数

Tab. 1 Experimental equipment and parameters for sapphire crystal lapping

设备及耗材	参数
研磨机	主轴 0~80 r/min, 摆轴 0~40 r/min,气动加压
研磨盘	直径 200 mm
工件盘	直径 65 mm
B4C 微粉粒度	W20, W10, W5
恒温加热平台	0~400 °C
超声波清洗仪	40 kHz
ATY224 天平	220 g, 0.1 mg
磁力搅拌器	0~3 000 r/min

### 3.2 表面粗糙度及表面形貌测量

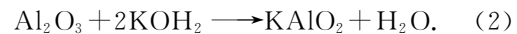
在每次研磨结束后,使用去离子水和超声波清洗机将蓝宝石表面清洗干净,采用德国 Bruker 公司的 ContourGT-X3 光学轮廓仪对蓝宝石表面粗糙度进行测量,其垂直分辨率为 0.01 nm,物镜采用 10 倍镜头,扫描范围为 0.62 mm×0.47 mm,每次测量 5 个点。刻蚀后的亚表面损伤层形貌采用 Leica 微分干涉显微镜观测,最大放大倍数为 500。设计晶片的定位工装,尽可能实现不同研磨工序和刻蚀结束后晶片粗糙度和表面形貌的同一位置测量,以提高测量结果的可靠性和准确性,增强实验结果的对比性。

### 3.3 蓝宝石亚表面损伤检测

蓝宝石晶体亚表面损伤检测主要有角度抛光法、截面透射电子显微镜法、磁流变抛光斑点法、拉曼光谱法以及 X-射线衍射法等<sup>[20-21]</sup>,但这些方法普遍存在不易精确控制等问题。本文借鉴光学玻璃亚表面损伤 HF 刻蚀的快速检测方法<sup>[22-24]</sup>,采用化学腐蚀的方法观察晶片的亚表面损伤。由于晶格缺陷处于能量较高的不稳定非平衡状态,因此在化学腐蚀剂的作用下,有缺陷和损伤处的晶格原子首先与腐蚀剂发生反应,释放出能量达到平衡状态,形成某种特定形状的腐蚀图形<sup>[25]</sup>,该方法可以将亚表面损伤等缺陷暴露出来。根据每次刻蚀减薄量得到刻蚀速率曲线,当刻蚀速率不再变化时,以刻蚀速率的拐点作为分界,计算累积刻蚀深度,计算值即为亚表面损伤深度。

### 3.3.1 蓝宝石晶片刻蚀

蓝宝石单晶在常温下性能非常稳定,不与酸碱反应,但在高温下可与熔融态的 KOH 溶液发生化学反应,其反应方程式见式(2)。在刻蚀实验时,每次腐蚀均称取 10 g 新鲜分析纯 KOH 置于镍坩锅中并加热至 300 °C 后恒温,待 KOH 变成熔融状态后,将加热后的蓝宝石晶片放入镍丝编制的篮框,进行化学腐蚀,每次刻蚀时间在 1~15 min。刻蚀结束后取出晶片让其冷却至室温,采用去离子水冲洗 3 min,0.5% 稀盐酸浸泡 15 min,去离子水冲洗 3 min,再用无水乙醇超声 15 min,吹干。



### 3.3.2 刻蚀深度测量方法

由于蓝宝石刻蚀的高温以及强碱环境,无法采用测量刻蚀台阶的方法计算刻蚀深度,此外直接测量刻蚀减薄量也很难找到一种高精度的测量方法,故在此用称重法,采用日本岛津 ATY224 0.1 mg 精密分析天平测量相邻两次刻蚀的质量差,可计算出每次刻蚀的深度,得到刻蚀速率曲线,进而计算亚表面损伤深度。

## 4 结果与讨论

### 4.1 刻蚀速率及深度曲线

蓝宝石晶片经粒度为 W20、W10 和 W5 的碳化硼磨粒双面研磨后,再经化学腐蚀,得到不同刻蚀时间下刻蚀速率与刻蚀深度,图 2 给出了刻蚀

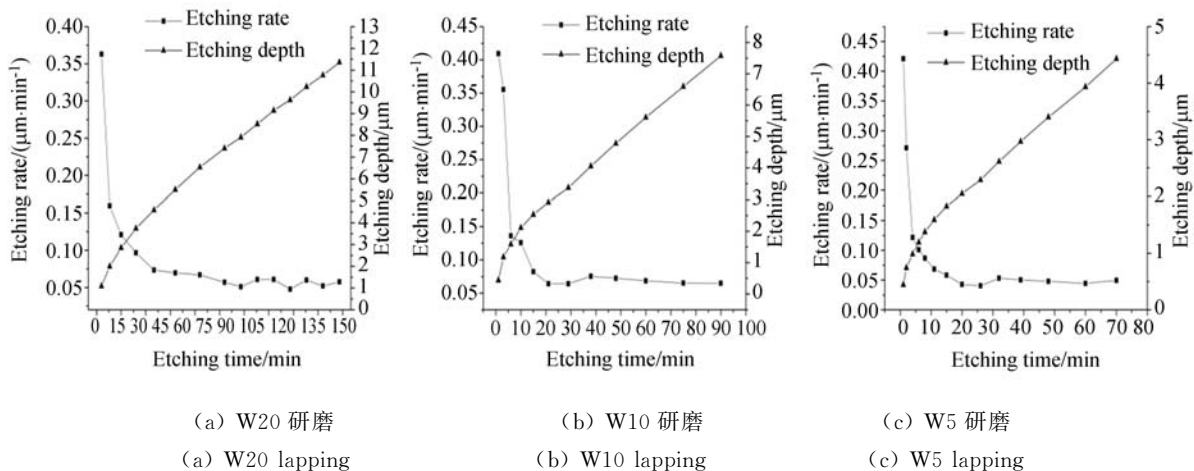


图 2 不同粒度碳化硼研磨后蓝宝石刻蚀速率及深度随刻蚀时间的变化规律

Fig. 2 Variation of etching rate and depth of sapphire with etching time for lapping with boron carbide in different sizes

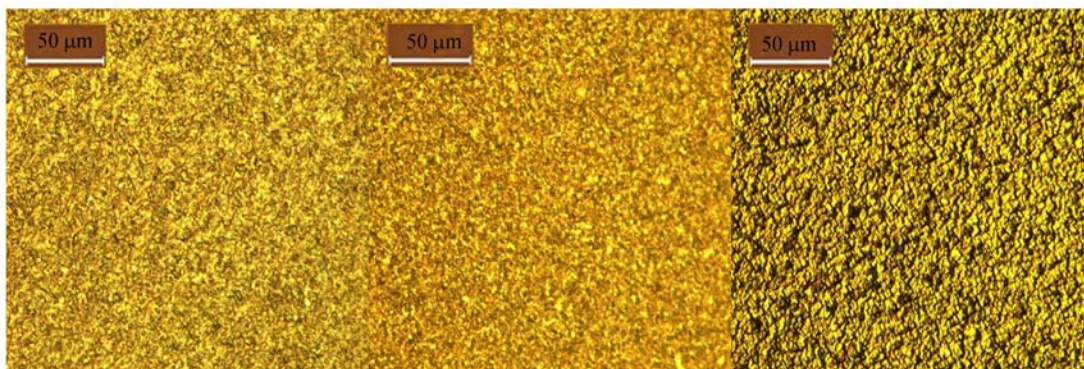
速率与刻蚀深度随刻蚀时间的变化规律。

由图 2 可知,随着刻蚀时间的增加,不同粒度碳化硼研磨后蓝宝石刻蚀速率及深度的变化规律基本相同:刻蚀速率不断降低,最后趋于稳定;刻蚀深度不断增加,刻蚀深度曲线斜率不断减小,最后趋于稳定,主要是由于刚开始阶段晶片亚表面损伤较多,微裂纹、残余应力等缺陷对化学腐蚀剂的作用更加灵敏,从而加剧了化学腐蚀速率,待腐蚀到材料基体时,亚表面损伤基本去除,刻蚀速率趋于恒定。图 2 同时引入了刻蚀速率与刻蚀深度曲线,刻蚀速率趋于恒定且刻蚀深度曲线斜率恒定的时刻可作为刻蚀的拐点,结合图 3 和图 5,判断 W20 磨料研磨后蓝宝石的刻蚀拐点对应的刻蚀时间是 78 min,进而计算亚表面损伤深度为  $7.4 \mu\text{m}$ 。照此方法,W10 和 W5 磨粒对应的亚表面损伤深度分别为  $4.1 \mu\text{m}$  和  $2.9 \mu\text{m}$ 。此外,实验发现 3 种粒度的磨料研磨的晶片经化学腐蚀

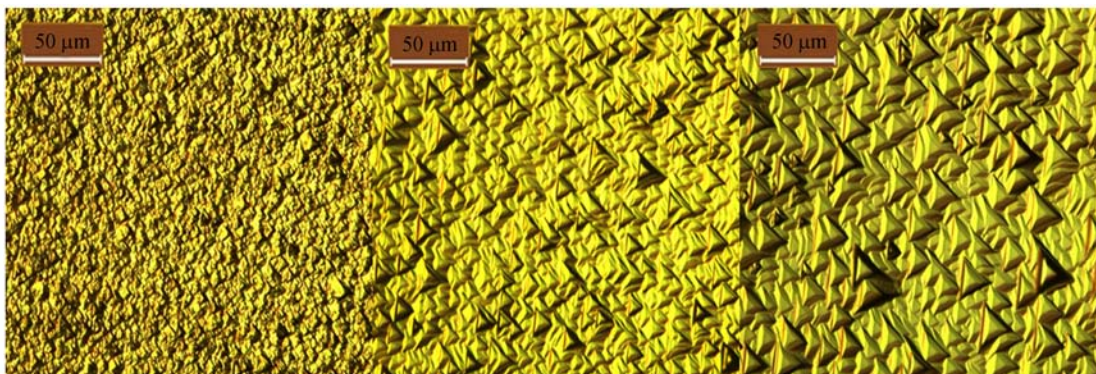
后,其材料基体刻蚀速率略有差别,W20、W10 和 W5 对应的基体刻蚀速率平均值分别为 0.057, 0.064 和  $0.050 \mu\text{m}/\text{min}$ 。实验选用的是同一个晶片,这个差别有可能是由于测量误差以及环境因素等导致的。

#### 4.2 刻蚀过程中亚表面损伤形貌与粗糙度的变化规律

在外载荷作用产生的应力下,键能较弱的离子或原子优先受到破坏,故亚表面损伤多集中在键合力较弱的离子或原子间,从而破坏了晶格排列。图 3 给出了经 W20 研磨和腐蚀后蓝宝石的形貌。由图可知,随着刻蚀时间的增加,研磨表面水解层逐步被 KOH 刻蚀掉,研磨造成的亚表面缺陷以特定图形间接显示出来。由于蓝宝石晶体 C(0001) 面,相邻  $\text{O}^{2-}$  间的作用力较弱而被腐蚀,易被断开,故而呈现出三角形的腐蚀坑形貌<sup>[26]</sup>。刻蚀是蚀坑的成核和表面台阶的运动过程,蚀坑



(a) 研磨表面 (b) 刻蚀 3 min (c) 刻蚀 8 min  
(a) Surface after lapping (b) Etching time of 3 min (c) Etching time of 8 min



(d) 刻蚀 24 min (e) 刻蚀 35 min (f) 刻蚀 48 min  
(d) Etching time of 24 min (e) Etching time of 35 min (f) Etching time of 48 min

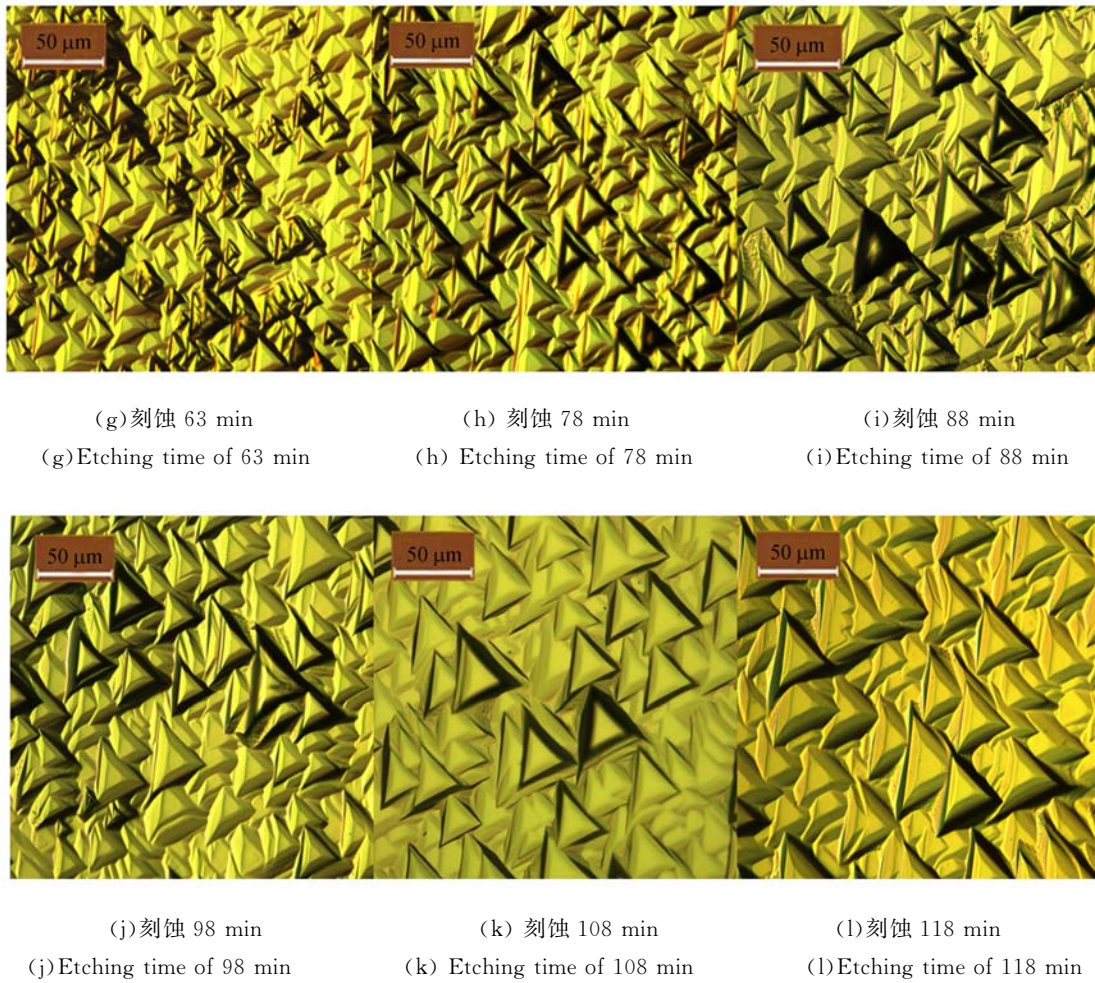


图 3 不同刻蚀时间下 W20 研磨得到的蓝宝石亚表面损伤形貌图

Fig. 3 Subsurface damage pattern of sapphire etched with boron carbide abrasive W20 for different time

在位错露头处优先出现,同时台阶以一定速度侧向运动,可用垂直于晶体表面的侵蚀速度和台阶沿表面运动的速度来表示,因此随着刻蚀时间的增加,腐蚀坑的尺寸也相应增大。与图 4 精抛后的腐蚀形貌对比,研磨后的腐蚀坑密度远远大于抛光后,可见研磨造成的亚表面损伤非常显著。

图 5 给出了不同粒度碳化硼磨料研磨后蓝宝石表面粗糙度随刻蚀时间的变化规律。由图可知,随着刻蚀时间的增加,刻蚀后晶片表面粗糙度先快速增大,然后逐渐稳定。这主要是在刻蚀过程中亚表面损伤不断暴露,微裂纹扩展,腐蚀坑不断变深,表面粗糙度逐渐增大,当刻蚀到材料基体时,表面粗糙度不再增大。此外,经 W20、W10 和 W5 研磨及腐蚀后蓝宝石的表面粗糙度逐步变小,这是因为研磨后晶体表面可看作是无数凹坑与凸峰的集合,刻蚀在整体上是沿着垂直于晶体

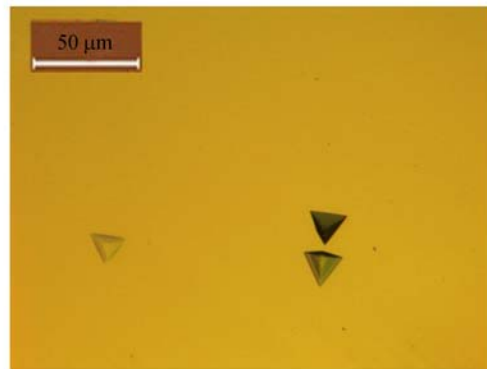


图 4 蓝宝石精抛后的腐蚀形貌

Fig. 4 Corrosion morphology of sapphire after precision polishing

表面的方向向内层进行,刻蚀后晶体表面粗糙度仍与研磨后晶体表面粗糙度保持跟随性。结合文献[10]可知,经 W20、W10 和 W5 研磨后蓝宝石

的亚表面损伤层深度逐渐减小,从腐蚀后晶体表面粗糙度的波动情况看,W5 研磨后蓝宝石在不同位置的亚表面损伤层深度基本一致,而 W20 研磨的蓝宝石在不同位置的亚表面层深度有一定变

化。损伤经过一段时间的腐蚀,当蓝宝石的表面粗糙度与刻蚀速率基本不变时,蓝宝石的亚表面损伤基本上得到去除,这为计算亚表面损伤深度提供了依据。

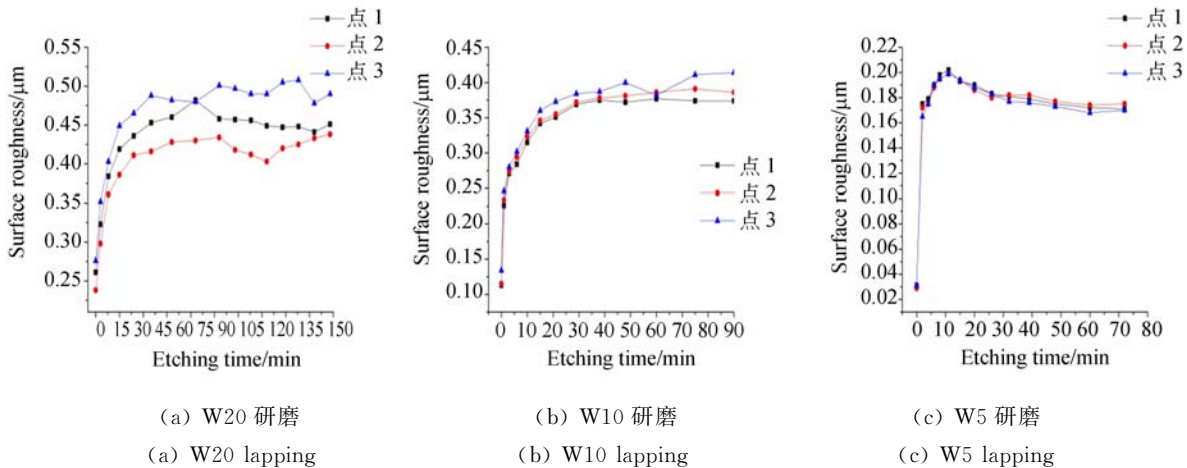


图 5 不同粒度碳化硼磨料和刻蚀时间下表面粗糙度的变化规律

Fig. 5 Variation of surface roughness with etching time for different sizes of boron carbide

#### 4.3 不同粒度磨料研磨后蓝宝石的亚表面损伤深度

在其他工艺参数保持不变的条件下,只改变碳化硼磨料的粒度进行蓝宝石的研磨,通过化学腐蚀方法获得了不同粒度磨料研磨后蓝宝石晶体的亚表面损伤深度。由图 6 可知,随着磨料粒度的增大,晶片单位面积下的研磨颗粒数目减少,因此大的研磨颗粒相对于小的颗粒承受的压力更大<sup>[27]</sup>,磨粒嵌入工件的深度增加,加剧了工件表面材料的脆性断裂,从而使微裂纹等缺陷扩大,由

式(1)可知,亚表面损伤深度随之加深。这与文献[28]的结论相符<sup>[28]</sup>。此外,采用不同粒度碳化硼磨料研磨时,蓝宝石晶体的亚表面损伤深度均较小,约为磨料粒度的 1/2 左右,因此,碳化硼磨料在减小蓝宝石亚表面损伤深度方面较金刚石磨料有明显的优势。

## 5 结 论

本文对不同粒度碳化硼磨料研磨后的蓝宝石晶体进行 KOH 化学腐蚀,可以发现,游离碳化硼磨料研磨造成的蓝宝石晶体亚表面损伤密度相当显著,但损伤深度并不大,W20、W10 和 W5 粒度的磨料研磨后产生的亚表面损伤深度分别为 7.4, 4.1 和 2.9  $\mu\text{m}$ ,约为磨料粒度的 1/2,明显低于金刚石磨料产生的亚表面损伤深度。同时,磨料粒度越大,蓝宝石晶体的亚表面损伤深度越大。蓝宝石晶体腐蚀后的表面粗糙度随刻蚀时间呈现先增大后稳定的变化趋势,与刻蚀速率先减小后趋于稳定形成对应关系,这两种变化规律有利于确定刻蚀速率的拐点,便于计算亚表面损伤深度。

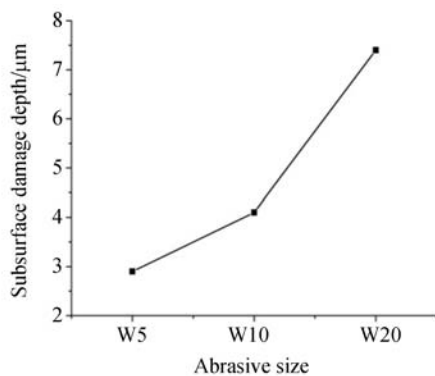


图 6 不同粒度碳化硼磨料产生的亚表面损伤深度

Fig. 6 Subsurface damage depth produced by different sizes of boron carbide

## 参考文献:

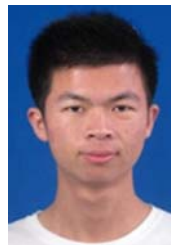
- [1] 周海. 衬底基片超精密加工技术[M]. 北京: 科学出版社, 2014.  
ZHOU H. *Ultra-Precision Machining Technology of Substrate Substrate*[M]. Beijing: Science Press, 2014. (in Chinese)
- [2] 吴健. 蓝宝石 CMP 加工机理与工艺技术的研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2012.  
WU J. *The Research on CMP Machining Mechanism and Technology for Sapphire Wafer*[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2012. (in Chinese)
- [3] 文东辉, 洪滔, 张克华, 等. 蓝宝石晶体的双面研磨加工[J]. 光学精密工程, 2009, 17(10): 2493-2498.  
WEN D H, HONG T, ZHANG K H, *et al.*. Dual-lapping process for sapphire crystal[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(10): 2493-2498. (in Chinese)
- [4] 孟庆平. 蓝宝石高效超精密磨削技术及损伤检测研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2009.  
MENG Q P. *Study on High Efficiency and Ultra-precision Grinding Process and Machining Damage of Sapphire*[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2009. (in Chinese)
- [5] HADER B, WEIS O. Superpolishing sapphire: a method to produce atomically flat and damage free surfaces[J]. *Surface Science*, 1989, 220(1): 118-130.
- [6] 刘道标, 徐晓明, 周海, 等. 蓝宝石衬底双面研磨亚表面损伤分布研究[J]. 中国机械工程, 2014, 25(19): 2568-2572.  
LIU D B, XU X M, ZHOU H, *et al.*. Study on distribution of subsurface damage on sapphire substrate after two-sided lapping[J]. *China Mechanical Engineering*, 2014, 25(19): 2568-2572. (in Chinese)
- [7] YOUNG H T, LIAO H T, HUANG H Y. Surface integrity of silicon wafers in ultra precision machining[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2006, 29(3-4): 372-378.
- [8] SURATWALA T, WONG L, MILLER P, *et al.*. Sub-surface mechanical damage distributions during grinding of fused silica[J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2006, 352(52-54): 5601-5617.
- [9] LI J, GAO P, ZHU Y W, *et al.*. Research on sub-surface damage after abrasives and fixed-abrasive lapping of K9 glass[J]. *Key Engineering Materials*, 2011, 487: 253-256.
- [10] 王卓, 吴宇列, 戴一帆, 等. 光学材料研磨亚表面损伤的快速检测及其影响规律[J]. 光学精密工程, 2008, 16(1): 16-21.  
WANG ZH, WU Y L, DAI Y F, *et al.*. Rapid detection of subsurface damage of optical materials in lapping process and its influence regularity[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, 16(1): 16-21. (in Chinese)
- [11] LV D X, WANG H X, ZHANG W W, *et al.*. Subsurface damage depth and distribution in rotary ultrasonic machining and conventional grinding of glass BK7[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, 86(9-12): 2361-2371.
- [12] 尹中伟. 蓝宝石单晶体裂纹振动扩展机理研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.  
YIN ZH W. *Research on Mechanism of Crack Propagation of Sapphire Single Crystal under Vibration Conditions*[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014. (in Chinese)
- [13] KUMAR P, LEE J, LEE G, *et al.*. Low temperature wet etching to reveal sub-surface damage in sapphire substrates[J]. *Applied Surface Science*, 2013, 273: 58-61.
- [14] 王建彬, 朱永伟, 王加顺, 等. 研磨方式对单晶蓝宝石亚表面损伤层深度的影响[J]. 人工晶体学报, 2014, 43(5): 1099-1104, 1120.  
WANG J B, ZHU Y W, WANG J SH, *et al.*. Effect of lapping methods on subsurface damage depth of single crystal sapphire[J]. *Journal of Synthetic Crystal*, 2014, 43(5): 1099-1104, 1120. (in Chinese)
- [15] 徐晓明, 刘道标, 周海, 等. 蓝宝石衬底双面研磨亚表面损伤双片式角度抛光法检测[J]. 现代制造工程, 2014(5): 118-123.  
XU X M, LIU D B, ZHOU H, *et al.*. Double-substrate angle polishing to detect the damage on sapphire substrate body after double-grinding[J]. *Modern Manufacturing Engineering*, 2014(5): 118-123. (in Chinese)
- [16] 张志斌. 蓝宝石衬底片双面研磨加工的面形精度及损伤控制的研究[D]. 泉州: 华侨大学, 2016.  
ZHANG ZH B. *Research on the Surface Shape Accuracy and Damage Control of Sapphire Wafer During Double-side Lapping*[D]. Quanzhou:

- Huaqiao University, 2016. (in Chinese)
- [17] 张瑜. 蓝宝石高效低损伤加工工艺研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2015.  
ZHANG Y. *Research on High-efficiency and Low-damage Processing of Sapphire*[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2015. (in Chinese)
- [18] CHANG Y P, HASHIMURA M, DORNFELD D A. An investigation of material removal mechanisms in lapping with grain size transition[J]. *Journal of Biomolecular Screening*, 2000, 122(3): 413-419.
- [19] LAMBROPOULOS J C, JACOBS S D, RUCKMAN J. Material removal mechanisms from grinding to polishing[J]. *Ceramic Transactions*, 1999, 102: 113-128.
- [20] BLACK D R, POLVANI R S, BRAUN L M, *et al.*. Detection of subsurface damage: studies in sapphire[J]. *SPIE*, 1997, 3060: 102-114.
- [21] RANDI J A, LAMBROPOULOS J C, JACOBS S D. Subsurface damage in some single crystalline optical materials[J]. *Applied Optics*, 2005, 44(12): 2241-2249.
- [22] 徐乐, 郭剑, 余丙军, 等. 一种快速检测单晶硅亚表面损伤层厚度的方法[J]. *机械工程学报*, 2016, 52(11): 108-114.  
XU L, GUO J, YU B J, *et al.*. Rapid detection on the thickness of sub-surface damage layer of silicon[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2016, 52(11): 108-114. (in Chinese)
- [23] 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 ZH X, ZHANG ZH, *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)
- [24] NEAUPORT J, AMBARD C, CORMONT P, *et al.*. Subsurface damage measurement of ground fused silica parts by HF etching techniques[J]. *Optics Express*, 2009, 17(22): 20448-20456.
- [25] 吕海涛, 张维连, 左燕, 等. 化学腐蚀法研究蓝宝石单晶中的位错缺陷[J]. *半导体技术*, 2004, 29(4): 48-51.  
LÜ H T, ZHANG W L, ZUO Y, *et al.*. Study on the dislocation of the sapphire crystal with chemical etching[J]. *Semiconductor Technology*, 2004, 29(4): 48-51. (in Chinese)
- [26] 吴小凤. 导模法生长蓝宝石晶体工艺及性能研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2015.  
WU X F. *Technics and Performances of Sapphire Crystals Grown by Edge-defined Film-fed Growth (EFG) Method*[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2015. (in Chinese)
- [27] SAMPURNO Y, SUDARGHO F, ZHUANG Y, *et al.*. Effect of cerium oxide particle sizes in oxide chemical mechanical planarization[J]. *Electrochemical and Solid-State Letters*, 2009, 12(6): H191-H194.
- [28] 朱永伟, 李信路, 王占奎, 等. 光学硬脆材料固结磨料研磨中的亚表面损伤预测[J]. *光学精密工程*, 2017, 25(2): 367-374.  
ZHU Y W, LI X L, WANG ZH K, *et al.*. Sub-surface damage prediction for optical hard-brittle material in fixed abrasive lapping[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25(2): 367-374. (in Chinese)

#### 作者简介:



谢春(1963—),女,博士,副教授,2013年于同济大学获得博士学位,主要从事机械设计、制造技术及自动化、材料加工工艺方面的研究。E-mail: xc0522@tongji.edu.cn



汪家林(1992—),男,湖北黄冈人,2015年于武汉纺织大学获得学士学位,主要从事光学元件超精密加工方面的研究。E-mail: wjl@tongji.edu.cn