

单晶蓝宝石基片抛光工艺研究进展

陈刚,肖强

西安工业大学

摘要: 对目前抛光单晶蓝宝石基片的工艺方法,如游离磨料磨削、金刚石砂轮磨削、在线电解修整磨削(ELID)、化学机械抛光(CMP)、固结软磨料抛光、磁流变抛光(MRF)、超声振动辅助磨削的加工原理、方法和特点进行综述。分析了各方法的优势和不足以及最新研究成果存在的关键问题。其中游离磨料磨削、在线电解修整磨削、金刚石砂轮磨削的材料去除速率较高,化学机械抛光是抛光大面积基片的唯一方法,磁流变抛光后的基片表面不存在亚表面损伤。根据单晶蓝宝石基片的应用需求和目前抛光方法的不足,对后续研究的方向进行了预测。

关键词: 单晶蓝宝石;游离磨料磨削;化学机械抛光;磁流变抛光;ELID磨削;超声振动辅助磨削

中图分类号: TG580.6;TH162;TB321

文献标志码: A

Progress Research in Polishing Process of Single Crystal Sapphire Substrate

Chen Gang, Xiao Qiang

Abstract: In this paper, processing principle, methods and characteristics of free abrasive grinding, diamond wheel grinding, on-line electrolytic dressing grinding (ELID), chemical mechanical polishing (CMP), consolidated soft abrasive polishing, magneto-rheological polishing (MRF), ultrasonic vibration assisted grinding, the advantages and disadvantages of each method are put forward. The key problems for the latest research results of each method are analyzed. Among them, the removal rate of free abrasive grinding, on-line electrolytic dressing grinding, diamond grinding wheel grinding material is high, chemical mechanical polishing is the only way to polish the large area of substrate, magneto-rheological polishing after the surface of the substrate does not exist sub-surface damage. According to the application requirements of single crystal sapphire substrate and the shortcomings of the current polishing method, the direction of the follow-up research is predicted.

Keywords: single crystal sapphire; free abrasive grinding; chemical mechanical polishing (CMP); magneto-rheological polishing (MRF); on-line electrolytic dressing grinding (ELID); ultrasonic vibration assisted grinding

1 引言

单晶蓝宝石基片是氧化铝的单晶形态(Al_2O_3),具有良好的光学、热学、介电性能和力学性能,使其在LED、消费电子、科学研究、医疗器械和航空航天等领域得到广泛应用^[1]。随着科学技术的快速发展,各个领域对单晶蓝宝石基片的需求量越来越大,尤其在一些高精尖技术领域,需要大量高品质低损伤的单晶蓝宝石基片,这对基片的精密与超精密抛光提出了更高的要求。单晶蓝宝石具有超高的材料硬度,硬度达到莫氏硬度9级,并且抗压强度大于抗弯强度,不易实现表面材料的塑性去除,因此对其进行超精密抛光十分困难。蓝宝石基片的传统加工工艺十分复杂,包括下料、磨削、抛光等多项工序,不仅工作周期长而且次品率高,无法满足目前各领域对单晶蓝宝石基片的应用需求^[2]。因此,

如何高效获得高质量低损伤的单晶蓝宝石基片成为超精密抛光领域的重要课题。

近年来,国内外专家学者相继提出了众多抛光单晶蓝宝石基片的方法,本文按照各个抛光方法的特点,对其进行了归纳分类,具体可以分为机械研磨抛光、化学反应抛光、特殊研磨力抛光、复合抛光和热能抛光。

2 机械研磨抛光

在众多抛光方法中,机械研磨抛光最为简单有效,其利用磨粒在基片表面的机械作用实现材料去除。游离磨料抛光、固定磨料抛光和在线电解修整抛光均属于机械研磨抛光。游离磨料抛光时在研磨盘和工件表面之间加入金刚石颗粒,在压力的作用下借助金刚石的滚动和滑擦进行材料去除。研磨过程中,由于各个磨粒的质量不同,因此受到的离心力也不同,磨粒在研磨盘上呈梯度分布,即从研磨盘中心到边缘磨粒粒度不断递增(见图1)。这一现象导致磨料与工件表面接触不均匀,加工稳定性较差,加工精度无法保证。另外,当研磨盘转速较大时,磨料

基金项目: 陕西省自然科学基金(2014JM7257);陕西省教育厅重点实验室项目(16JS046);陕西省教育厅重点实验室访问学者项目(14JS029);陕西省特种加工重点实验室开放基金(ST-11006)
收稿日期: 2017年6月

浪费严重还造成了污染。

固定磨粒的抛光方法包括金刚石砂轮磨削、金刚石研磨盘磨削和研磨垫磨削。Marcel Patraschko^[3]介绍了一种双面金刚石研磨新工艺,该工艺将金刚石颗粒镶嵌在研磨盘里,不同大小的金刚石模块组成了盘面(见图2)。此方法克服了磨粒在研磨盘上分布不均的缺点,极大地提高了磨削后基片的面形精度,并且节省了磨料减少了污染,但是其材料去除率低于游离磨料磨削。

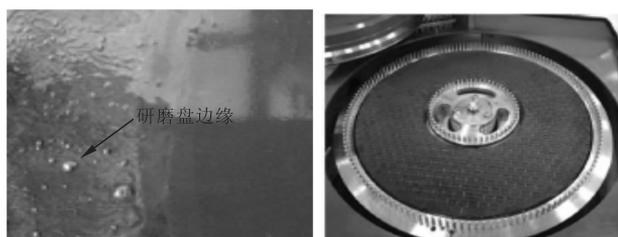


图1 磨粒分布 图2 双面金刚石研磨盘^[3]

金刚石砂轮磨削常用在蓝宝石基片的粗磨过程中,将基片固定在下研磨盘中,通过砂轮的自转和公转进行磨削,其中最关键的问题是当砂轮出现钝化后会拉伤基片表面产生较深的划痕,柏教林等^[4]将易熔玻璃作为增砺料,减小了砂轮的钝化率,实验测试表明在蓝宝石的磨削中取得了较好的效果。Ebina Y. 等^[5]用金刚石砂轮磨削蓝宝石基片时,发现金刚石晶粒在砂轮和工件界面处严重移动,通过增加砂轮速度,可以获得更好的表面粗糙度。

与金刚石研磨盘磨削相比,采用研磨垫磨削降低了大颗粒磨粒对基片表面的损伤。磨削过程中,当大颗粒磨粒受力不均时,大颗粒磨粒就会没入研磨垫中,防止其嵌入基片表面造成大的损伤。Fujita T. 等^[6]使用由软层和硬层结构组成的研磨垫对单晶蓝宝石实现了高效精密加工,该方法增加了研磨垫和工件在高抛光压力下的接触面积,从而增加了有效研磨剂的数量和去除体积。

天然金刚石产量十分稀少,造价高昂,无法满足工业上大批量的使用。卢文壮等^[7]采用人造金刚石涂层工具对单晶蓝宝石基片抛光,在一定加工参数下,表面粗糙度为 $0.354\mu\text{m}$,表面粗糙度值偏大。随后,Feng W. 等^[8]研究了在水、3%乙二醇和3%乙二胺分别作为研磨液时单晶蓝宝石上的金刚石涂层工具的表面特征。结果表明,金刚石涂层工具的摩擦学性能与液体环境相关。在3%乙二胺溶液下金刚石涂层工具摩擦系数最小,而在水溶液下摩擦系数最大,使用乙二胺作为研磨液可以减小金刚石划伤基片表面的概率。随着该方法的不断成熟,在获

得高质量单晶蓝宝石基片的前提下,将极大地减小对天然金刚石的依赖,降低加工成本。

在线电解修整磨削是一种将磨削和砂轮修锐结合的技术,其基本原理见图3^[9]。砂轮表面的金属结合剂在电流作用下被电解去除,崭新锋利的磨粒不断露出,同时在其表面形成致密氧化膜抑制砂轮过度电解,这项技术有效解决了磨削过程中砂轮钝化的问题,使砂轮始终以最佳磨削状态连续进行磨削加工,加工效率高,材料去除率高,但是该方法不可避免地会在基片表面产生亚表面损伤。基于硬压断裂理论,当材料去除方式为脆性去除时,硬质磨料嵌入基片表面,在塑性变形区域下形成了平行于表面的横向裂纹和垂直于表面的径向裂纹,横向裂纹导致切屑脱落,降低表面粗糙度,径向裂纹则引起亚表面损伤^[10,11]。

单晶蓝宝石材料的去除方式主要有脆性去除和塑性去除,相关研究表明,要实现塑性去除,磨粒的最大切削深度应小于材料的临界切削深度。吴涛^[12]运用ELID方法对蓝宝石进行塑性磨削研究,结果表明,当单位进给量为 $1\mu\text{m}$ 、砂轮转速为1900rpm时,蓝宝石处于塑性域磨削,得到表面粗糙度值为 3.2nm 。ELID超精密磨削中,砂轮氧化膜的厚度、修整电流强度、电解电压等加工参数对加工表面质量起着重要作用。Han P. 等^[13]使用声发射系统监测ELID的磨削过程,在修整电流强度、表面光洁度和声发射信号之间发现相关性,结果表明使用更高的修整电流和更高的砂轮磨损率可以获得更光滑的表面。Makarenko I. 等^[14]对ELID磨削蓝宝石过程中的氧化层厚度进行了研究,结果表明氧化层厚度取决于砂轮材料和ELID修整参数,氧化层显著影响研磨性能和表面光洁度。

以上各种机械研磨抛光方法都具有磨削效率高、材料去除率高、加工装置简单易操作的优点,其大多应用在蓝宝石基片的精磨阶段,旨在消除切片后造成的划痕,提高基片表面的均匀性和平面度,但这些方法会造成亚表面损伤。后续研究可将机械研磨与其他抛光方法结合,通过后续抛光去除精磨过程产生的亚表面损伤层,从而获得高质量低损伤的单晶蓝宝石基片。Zhou S. 等^[15]先用机械研磨实现快速减薄,再进行化学机械抛光,实验结果表明,在 $20\text{mm}\times 20\text{mm}$ 大小的蓝宝石衬底上,机械研磨后的表面粗糙度为 20.8nm ,CMP后的表面粗糙度达到 0.738nm ,将两种技术结合的做法极大地减少了加工时间,提高了加工效率。

3 组合抛光

化学机械抛光 (CMP) 和固结软磨料抛光 (MCP) 均为机械磨削和化学腐蚀的组合技术, 但两者原理截然不同。化学机械抛光的原理见图 4, 整个抛光系统由载盘、旋转工作台和抛光液供给装置组成, 抛光过程中, 将蓝宝石基片粘贴在载盘上, 并在压力作用下将载盘反向压在旋转工作台的抛光垫上, 抛光液不断地在抛光垫和基片表面流动, 基片与抛光液发生化学反应生成硬度低于蓝宝石晶体的物质, 并随着旋转工作台的转动被机械去除^[16]。

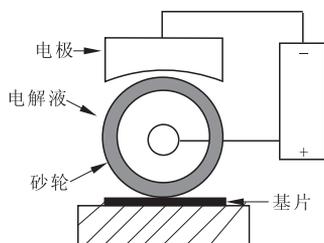


图3 ELID 磨削原理

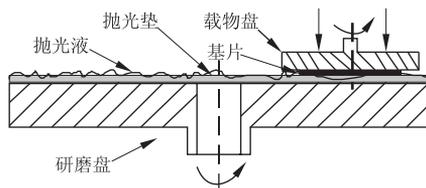
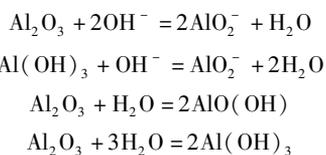


图4 化学机械抛光原理

用于单晶蓝宝石化学机械抛光的抛光液为碱性, pH 约为 10 - 12, 抛光液与基片表面的反应机理目前还没有定论。大多数人认为在碱性环境下基片表面与抛光液发生如下化学反应:



Al_2O_3 部分与水反应生成硬度小于基片表面的水合物, 另一部分与水反应生成易溶于水的 AlO_2^- ^[17,18]。而马振国等^[19]认为蓝宝石表面和 OH^- 的反应机理与 Al_2O_3 和 OH^- 的反应机理不同。由于蓝宝石晶体的结构, 在碱性环境下, 表面的 Al 原子或 O 原子分别与抛光液形成 Al - OH 和 O - OH 水解层, 之后带负电的 SiO_2 粒子分别与 OH^- 和蓝宝石表面的悬挂键形成化学键, 随着旋转工作台的转动将 Al 原子和 O 原子去除。Zhou Y. 等^[20]认为当使用 SiO_2 作为抛光液中的磨粒时, SiO_2 与蓝宝石表面反应生成硅酸铝 ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_7 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), 硅酸铝粘

附性很强, 蓝宝石表面材料随着 SiO_2 一起被带走。CMP 过程中化学反应和机械作用同时发生, 化学反应生成的软质层随着机械运动被去除后, 新裸露出的晶体表面与新注入的抛光液再次发生化学反应生成新的软质层, 如此循环往复, 直至获得高质量的基片表面。抛光液成分、磨料粒度、磨削速度和磨削压力等都是影响抛光质量的关键因素。Hu X. K. 等^[21]在研磨和抛光过程中, 分别用 B_4C 和纳米二氧化硅作为研磨剂对蓝宝石晶片平面化, 实验表明 B_4C 可以有效去除晶片内厚度的不均匀性, 胶体二氧化硅可以实现晶片的纳米级平坦度, 但不可持续抛光。Xu L. 等^[22]通过实验发现, 在抛光液中添加非金属催化剂 $\text{Fe} - \text{N}_x/\text{C}$ 可以提高蓝宝石单晶的去除质量, 并获得原子级平滑的蓝宝石晶体表面, 表面粗糙度可达 0.078nm。

相对于其他抛光技术, 化学机械抛光最大的优点是可以实现全局平坦化, 并且抛光表面质量高, 满足了目前对大面积、高质量蓝宝石衬底的加工需求。但其也有不足之处, 抛光液会污染基片表面, 后续的清洗工艺十分复杂。针对这一问题, Gao S. 等^[23]研制了一种基于有机物的精细的 CMP 浆料, 可以有效解决抛光过程中金属离子污染、分散性差和材料去除率等问题。

固结软磨料抛光工艺也可以称为机械化学抛光 (MCP), 抛光过程中软磨料代替 CMP 中的抛光液与晶体表面发生化学反应, 其加工原理见图 5^[24]。单晶蓝宝石基片粘贴于载物盘底部, 借助固结软磨料磨盘与单晶蓝宝石基片之间的摩擦力作用, 载物盘公转的同时还做自转运动。通过调整载物盘上砝码的重量可以调节研磨压力。在研磨过程中, 磨粒与单晶蓝宝石基片局部接触产生大量摩擦热, 在接触点处会瞬间产生闪点高温, 瞬间达到两种物质的固相化学反应温度。固相化学反应发生后生成一种硬度小于单晶蓝宝石基片的钝化层, 最后借助磨粒的机械作用去除。MCP 中的磨粒既要求具有切削作用, 又要求能够与单晶蓝宝石基片发生固相化学反应, 目前已知的物质有氧化镁 (MgO)、二氧化硅 (SiO_2)、二氧化铈 (CeO_2)、氧化铁 (Fe_2O_3)、 α 相氧化铝 ($\alpha - \text{Al}_2\text{O}_3$) 等。

由加工原理可知, 能否发生固相化学反应取决于磨粒和单晶蓝宝石基片之间的接触表面温度和相对运动速度。因此, 要实现连续的固相化学反应, 需要满足以下三个条件^[25]: ①研磨过程中产生的摩擦热, 要达到固相化学反应的反应温度; ②反应生成的

钝化层可以持续不断地通过磨粒机械作用去除；③研磨过程中，磨粒始终与蓝宝石基片保持紧密接触状态。

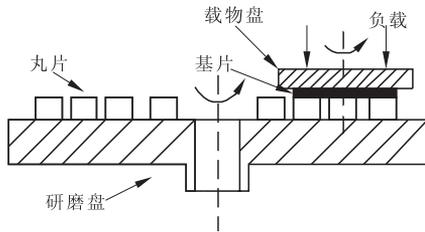


图5 固结软磨料抛光原理

关于此项抛光技术的研究相对较少，臧江龙^[26]通过实验得出采用粒度W2、浓度300%的 α - Al_2O_3 氯氧镁结合剂制成的抛光盘磨削蓝宝石可取得良好的加工效果，其表面粗糙度和材料去除率可分别达到0.3nm和0.22 $\mu\text{m}/\text{min}$ 。 α - Al_2O_3 可与蓝宝石基体表面发生固相化学反应生成硬度小于 α - Al_2O_3 的水化层，可通过机械作用轻易去除，此外， α - Al_2O_3 与蓝宝石的硬度相同，不会划伤基片表面。Xu Y.等^[27]对比研究了使用软硬混合研磨剂和硬质磨料的蓝宝石晶片材料去除机理，实验表明MCP中混合研磨剂的去除率高于单硬磨料的52.6%，表面粗糙度降低超过单硬磨料的21.6%。软硬混合研磨剂的主要成分为高反应性二氧化硅和金刚石，磨削过程中二氧化硅与晶体表面发生固相化学反应生成硬度较低的钝化层，在金刚石的机械作用下该钝化层被光滑去除。当硬磨料的机械去除效果和软磨料的化学腐蚀效应处于动态平衡状态时，可以实现具有高去除率和良好表面质量的蓝宝石晶片的理想平面化。此项技术不仅可以加工蓝宝石基片，并且可以用来磨削其他硬脆材料，Chen C. A.等^[28]运用机械化学抛光技术对硅基片进行磨削试验，最终基片表面粗糙度 R_a 可达到0.633nm。

在化学机械抛光中，抛光液容易将磨粒和加工表面摩擦作用所产生的热量带走，降低化学反应速度，同时在抛光过程中受到液体动压的影响，磨粒很难进入蓝宝石晶片的表面，实际参与磨削的磨粒数远远小于抛光液中的磨粒，而在固结软磨料抛光中，参与抛光作用的磨粒数量大大增加，而且加工过程中热量不会被带走，因此MCP的加工效率较高^[29]。

4 特殊研磨力抛光

磁流变抛光工艺是获得超光滑、超精密蓝宝石衬底表面的较理想工艺，其基本原理为磁流变液在外加磁场的

作用下，当该流体通过运动轮与基片表面的间隙时，就会与工件表面的接触区域产生巨大的剪切力，随着运动轮与工件的转动，基片表面的材料被光滑去除。磁流变抛光是一种柔性抛光方法，抛光磨粒通过剪切作用使基片表面产生微观裂纹，该裂纹只在基片表面横向延伸，不会扩展至亚表面层以下，因此不会产生亚表面损伤。

传统磁流变抛光装置见图6，基片位于运动轮上方，磁场作用下的黏塑性流体与基片表面是一种“点面”接触方式，抛光过程中，只有当黏塑性流体遍历基片表面的所有点时，才能完全实现材料去除，抛光效率低下。广东工业大学结合磁流变抛光原理和集群作用原理提出集群磁流变抛光技术，该技术改变了黏塑性流体与工件表面的接触方式，由“点面”接触变为“面面”接触，提高了抛光效率和成品率，使其更加适合加工硬脆材料工件表面^[30-32]。

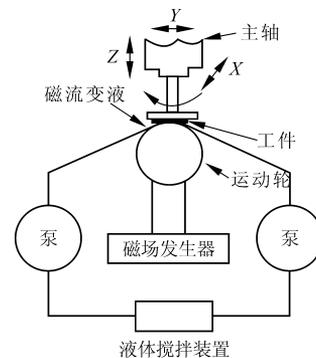
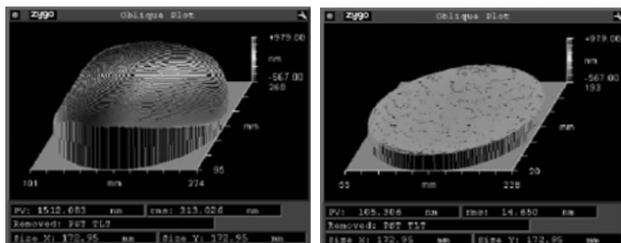


图6 传统磁流变抛光装置^[34]

Lambropoulos J. C.等^[33]分别使用含有金刚石和氧化铝/尖晶石磨料的磁流变液体来研究单晶蓝宝石去除速率的各向异性。实验表明，去除速率各向异性取决于磨料的类型，并且各向异性对于氧化铝/尖晶石磨料更为显著。大型蓝宝石视窗材料具有很大的抛光难度，不仅抛光面积大而且精度要求高，Hallock B.等^[34]运用磁流变抛光技术对长度为0.5m左右的蓝宝石窗口材料进行抛光，最终表面粗糙度达到0.07 μm 以下，并且抛光时间短加工成本低。抛光液pH是影响抛光质量的关键因素，Guo W. J.等^[35]使用环形磁流变抛光设备对蓝宝石基片进行抛光实验，主要研究抛光液pH对材料去除的影响，随着抛光液pH的增加，蓝宝石基片材料去除率提高，粗糙度值趋于收敛，当pH大于12.5时，粗糙度将增大。在最佳条件下，蓝宝石衬底的最大材料去除率为5.6 $\mu\text{m}/\text{h}$ ，抛光后的原始表面粗糙度从11nm减小到0.84nm。在实际抛光过程中，抛光液pH不可能始终维持在最佳值，pH较大或较小都无

法达到好的抛光效果,因此应实时检测抛光液的 pH。

磁流变抛光采用柔性磨头,主要依靠磨粒的剪切作用进行材料去除,材料去除速率较低,Yin S. 等^[36]将磁流变和化学机械抛光技术结合对蓝宝石衬底进行抛光实验,很好弥补了这一不足,结果表明,化学反应速率越快,剪切力越强,材料去除率越高,并最终获得表面粗糙度 R_a 为 0.3nm 的超光滑表面。Supranowitz C. 等^[37]提出运用单点金刚石车削和磁流变抛光的组合技术可以在包括氟化钙、硅和镀镍铝的各种材料上制造高精度表面。实验证明,经过磁流变抛光的蓝宝石视窗材料的透射波前误差可以从 1512nm PV/313nm RMS 提高到 105nm PV/15nm RMS(见图 7)。



(a) 抛光前

(b) 抛光后

图 7 180mm 的 a 面蓝宝石窗口透射波前校正^[37]

磁流变抛光技术除不会产生亚表面损伤外,所使用的磁流变液还可以循环使用,极大地减少了加工成本。在外加磁场的作用下,磁流变液可以在液态和类固态 Bingham 体之间自由转换,不会出现钝化现象,一直保持良好的加工状态。但是其材料去除机理尚无定论,各个加工参数对抛光表面的具体影响尚不明了,因此还需深入研究。

超声振动磨削是一种将超声振动和金刚石磨削结合的复合加工技术,相对于其他加工方法,最大的优点是不依赖材料的导电性,也没有热物理作用和化学作用,因此尤其适合非金属硬脆材料的加工。蓝宝石晶体超声振动加工的基本原理见图 8^[38],超声振动使刀具与蓝宝石表面达到共振状态,在表面 0-30 μ m 范围内击碎,并经后续研磨去除。

传统磨削方法将磨粒压入蓝宝石晶体表面引起挤压应力,使晶体表面产生微观裂纹不断扩展,最终断裂成屑。由于无法控制裂纹方向,使得亚表面损伤严重。与常规研磨相比,超声振动辅助研磨技术的研磨力显著降低,减少了造成刮痕的负荷,有效抑制了微裂纹扩展和提高塑性去除比例,极大地提高加工表面质量^[39,40]。Miura Takuya 等^[41]运用螺旋超声辅助研磨(SUAG)技术磨削蓝宝石晶片,研究

发现 SUAG 技术减小了磨削过程中正向和切向研磨力,并降低了表面粗糙度。Liang Z. 等^[42]提出了一种新的椭圆超声波辅助研磨(EUAG)方法,通过使用椭圆形超声波振动器,在工件上施加椭圆形超声波振动。研究表明,EUAG 方法可以改进金刚石砂轮的磨削性能,并且与一维超声波振动相比,基片表面质量明显提升。除以上方法外,还可以通过给研磨液中的磨粒施加超声波振动达到去除材料的目的。磨粒在超声波作用下具有很高的加速度,无数磨粒不断冲击加工表面,使晶体表面材料破碎和去除。由于超声波的特殊性,超声振动可以降低研磨阻抗,使磨削液产生空化作用,从而大大提高加工效率。随着加工过程的进行,磨粒会出现钝化,磨粒运动轨迹无法控制,浪费严重。

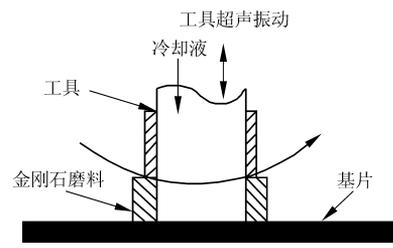


图 8 蓝宝石晶体超声振动加工原理

5 其他加工方法

除以上加工方法外,近几年出现的蓝宝石新型加工技术也日趋成熟。Bastawros A. F. 等^[43]利用大气压等离子体的化学作用对单晶蓝宝石进行加工,大气压等离子体可以在蓝宝石表面产生薄的水化层,该水化层比蓝宝石更软,可以实现更高的材料去除率,并有利于减轻 CMP 后的清洁和环境污染负担。Wu J. L. 等^[44]讨论了当使用 100 $^{\circ}$ C 水蒸汽作为抛光液、雪松木作为抛光垫时单晶蓝宝石(0001)的抛光特性,经过 20 小时的水合抛光,在 X 方向和 Y 方向的表面粗糙度可以减少到 6.74nm 和 7.64nm。Shamir A. 等^[45]采用超短脉冲激光在 1mm \times 15mm 面积的蓝宝石衬底上实现了 180mm 深度的烧蚀加工。

6 结语

目前单晶蓝宝石基片的抛光工艺还处于研究阶段,各个方法均有待完善。随着对超精密加工方法的追求,单晶蓝宝石基片将更加广泛地应用于各个领域。根据目前的研究情况,各种抛光工艺将沿着以下几个方向发展:

(1) 磁流变抛光技术在单晶蓝宝石基片的抛光

中优势明显,但其材料去除机理至今未形成统一的理论。在后续研究中,应针对其材料去除机理进行系统化研究,这对实现材料的确定性去除具有重要意义。

(2)大面积的单晶蓝宝石基片广泛应用在高质量的面向微波应用的大面积高温超导薄膜制备上,但以上抛光方法大都无法应用在大面积单晶蓝宝石基片的抛光中,因此应对各个抛光方法继续深入研究,使其适用于大面积单晶蓝宝石基片的抛光^[46]。

(3)所有抛光方法均应向环保、节约化的方向发展。化学机械抛光中,抛光液严重污染基片表面,为后续清洗工艺造成很大负担。在游离磨料磨削和超声振动磨削中,磨粒运动轨迹不受控制,浪费严重。因此新式抛光装置的开发将成为研究热点之一^[47]。

参考文献

- [1] 范志刚,刘建军,肖昊苏,等. 蓝宝石单晶的生长技术及应用研究进展[J]. 硅酸盐学报,2011,39(5):880-891.
- [2] 周海. 蓝宝石镜面加工工艺的改进[J]. 金刚石与磨料磨具工程,2000(5):47-49.
- [3] Marcel Patraschkov. Dopa application note - sapphire, internal technical report[R]. Dopa Diamond Tools,2014.
- [4] 柏教林,邓远东,安郁泰. 金属结合剂金刚石磨具自砺性的研究[J]. 金刚石与磨料磨具工程,2008(3):74-77.
- [5] Ebina Y, Hang W, Zhou L B, et al. Study on grinding processing of sapphire wafer[J]. Advanced Materials Research, 2012,565:22-27.
- [6] Fujita T, Enomoto T, Tominaga S, et al. High efficient finishing by using a structure-controlled polishing pad (improvement of contact condition between pad and work-piece); improvement of contact condition between pad and work-piece [J]. Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers,2008,74(747):2803-2808.
- [7] 卢文壮,杨斌,冯伟,等. 应用 CVD 金刚石涂层工具研磨单晶蓝宝石[J]. 光学精密工程,2016,24(3):540-546.
- [8] Feng W, Lu W, Zhou H, et al. Surface characterization of diamond film tool grinding on the mono-crystal sapphire under different liquid environments[J]. Applied Surface Science,2016,387:784-789.
- [9] 肖强,朱育权,王文娟,等. ELID 磨削工艺参数优化对光学玻璃表面质量影响的试验研究[J]. 机床与液压,2008,36(2):68-69.
- [10] Esmailzare A, Rahimi A, Rezaei S M. Investigation of sub-surface damages and surface roughness in grinding process of zerodur; glass-ceramic [J]. Applied Surface Science, 2014,313(7):67-75.
- [11] Hashimura M D D A. An investigation of material removal mechanisms in lapping with grain size transition[J]. Journal of Bio-molecular Screening,2000,122(3):413-419.
- [12] 吴涛. 蓝宝石单晶 ELID 磨削表面质量研究[D]. 秦皇岛:燕山大学,2006.
- [13] Han P, Marinescu I D, Srivastava A. A study on electrolytic in-process dressing (ELID) grinding of sapphire with acoustic emission[C]. ASME 2009 International Manufacturing Science and Engineering Conference, 2009:699-705.
- [14] Makarenko I, Vogt C, Rascher R, et al. ELID supported grinding of thin sapphire wafers[C]. 5th International Symposium on Advanced Optical Manufacturing and Testing Technologies, Dalian, October 7,2010.
- [15] Zhou S, Liu S. Study on sapphire removal for thin-film LEDs fabrication using CMP and dry etching[J]. Applied Surface Science,2009,255(23):9469-9473.
- [16] 王银珍,周圣明,徐军. 蓝宝石衬底的化学机械抛光技术的研究[J]. 人工晶体学报,2004,33(3):441-447.
- [17] 牛新环,刘玉岭,檀柏梅,等. 蓝宝石衬底化学机械抛光的机理研究[J]. 功能材料,2007(A10):4096-4099.
- [18] 高翔,周海,黄传锦,等. 蓝宝石衬底化学机械抛光中材料去除特性的研究[J]. 制造业自动化,2014(16):86-89.
- [19] 马振国,刘玉岭,武亚红,等. 蓝宝石衬底 nm 级 CMP 技术研究[J]. 微纳电子技术,2008,45(1):51-54.
- [20] Zhou Y, Pan G, Shi X, et al. AFM and XPS studies on material removal mechanism of sapphire wafer during chemical mechanical polishing (CMP) [J]. Journal of Materials Science; Materials in Electronics, 2015, 26(12):9921-9928.
- [21] Hu X K, Song Z, Pan Z, et al. Planarization machining of sapphire wafers with boron carbide and colloidal silica as abrasives[J]. Applied Surface Science, 2009, 255(19):8230-8234.
- [22] Xu L, Zou C, Shi X, et al. Fe-N X/C assisted chemical-mechanical polishing for improving the removal rate of sapphire[J]. Applied Surface Science,2015,343:115-120.
- [23] Gao S, Kang R K, Jin Z J, et al. Research on the polishing performance of CMP slurry for the sapphire crystal[J]. Advanced Materials Research,2011,325:457-463.
- [24] 程国良. 超精密磨削蓝宝石基片的软磨料砂轮磨削性能[D]. 大连:大连理工大学,2008.
- [25] Yasunaga N, Obara A, Imanaka O. Effect of solid state reaction on wear of sapphire sliding on steel[J]. Journal of the Japan Society for Precision Engineering, 1978, 44(522):717-723.
- [26] 臧江龙. 单晶蓝宝石基片固结磨料机械化学抛光技术

- [D]. 大连:大连理工大学,2013.
- [27] Xu Y, Lu J, Xu X. Study on planarization machining of sapphire wafer with soft-hard mixed abrasive through mechanical chemical polishing[J]. Applied Surface Science, 2016,389:713 – 720.
- [28] Chen C A, Shu L S, Lee S R. Mechano – chemical polishing of silicon wafers[J]. Journal of Materials Processing Technology,2003,140(1 – 3):373 – 378.
- [29] 雷阳,周兆忠,吕冰海,等. 蓝宝石基片干式化学机械抛光的研究[J]. 航空精密制造技术,2013,49(1):7 – 10.
- [30] 卓志国,周海,徐晓明,等. LED用蓝宝石衬底抛光技术进展[J]. 机械设计与制造,2013(4):249 – 251.
- [31] 李中会,杨建国,邱明君. 磁流变抛光技术及其质量控制的研究[J]. 工具技术,2010,44(3):11 – 14.
- [32] 阎秋生,高伟强,路家斌. 基于磁流变效应的研磨抛光方法及其抛光装置[P]. 广东:CN100999061,2007 – 07 – 18.
- [33] Lambropoulos J C, Jacobs S D. Exploring anisotropy in removal rate for single crystal sapphire using MRF[J]. Proceedings of SPIE—The International Society for Optical Engineering,2001,4451:277 – 285.
- [34] Hallock B, Dumas P, Shorey A, et al. Recent advances in deterministic low-cost finishing of sapphire windows[J]. Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering,2005,5786.
- [35] Guo W J, Guo Z D. Sapphire substrate ring-belt magnetorheological polishing processing[J]. Advanced Materials Research,2013,683:616 – 620.
- [36] Yin S, Wang Y, Yepeng L I, et al. Experimental study on magneto-rheological chemical polishing for sapphire substrate[J]. Journal of Mechanical Engineering,2016.
- [37] Supranowitz C, Hall C, Dumas P, et al. Improving surface figure and micro-roughness of IR materials and diamond turned surfaces with magneto-rheological finishing (MRF)[C]. Defense and Security Symposium. International Society for Optics and Photonics,2007:2.
- [38] 韩杰才,许承海,左洪波,等. SAPMAC法蓝宝石单晶的生长、检测与超声震动加工[J]. 哈尔滨工业大学学报,2010,42(3):398 – 403.
- [39] Zhang C, Feng P, Zhang J. Ultrasonic vibration-assisted scratch-induced characteristics of c-plane sapphire with a spherical indenter[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture,2013,64(4):38 – 48.
- [40] Akselrod M S, Bruni F J. Modern Trends in Crystal Growth and New Applications of Sapphire[J]. Journal of Crystal Growth,2012,360(1):134 – 145.
- [41] Miura Takuya, Wu Yongbo, Fujimoto Masakazu, et al. Grinding performance of spiral ultrasonic assisted grinding for mono-crystal sapphire using vitrified diamond wheel[C]. Proceedings of the 8th International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21st Century LEM 2015. Japan; Kyoto,2015.
- [42] Liang Z, Wu Y B, Wang X B, et al. A two-dimensional ultrasonically assisted grinding technique for high efficiency machining of sapphire substrate[J]. Materials Science Forum,2009,626 – 627:35 – 40.
- [43] Bastawros A F, Chandra A, Poosarla P A. Atmospheric pressure plasma enabled polishing of single crystal sapphire[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2015, 64(1):515 – 518.
- [44] Wu J L, Wang W F, Gao P F, et al. Hydration polishing of sapphire[J]. Advanced Materials Research,2010,102 – 104:695 – 699.
- [45] Shamir A, Ishaaya A A. Large volume ablation of sapphire with ultra-short laser pulses[J]. Applied Surface Science, 2013,270(14):763 – 766.
- [46] 游峰. 面向微波应用的铌系高温超导薄膜研究[D]. 天津:南开大学,2010.
- [47] 陈逢军,唐宇,苗想亮,等. 磨料射流表面抛光研究综述[J]. 表面技术,2015,44(11):119 – 127.
- 第一作者:陈刚,硕士研究生,西安工业大学机电工程学院,710021 西安市
- First Author: Chen Gang, Postgraduate, School of Mechatronic Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China*
- 通信作者:肖强,博士,教授,西安工业大学机电工程学院,710021 西安市
- Corresponding Author: Xiao Qiang, Doctor, Professor, School of Mechatronic Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China*