

基于层叠式夹持超薄蓝宝石晶片双平面加工实验研究

陈芝向¹, 袁巨龙¹, 杭伟¹, 王勤峰², 许良¹, 吕冰海¹

(1.浙江工业大学 超精密加工研究中心, 杭州 310023;

2.天通控股股份有限公司, 浙江 海宁 314412)

摘要:目的 针对超薄蓝宝石晶片的双平面加工, 研究基盘表面高度差对工件平面度的影响, 确定双平面加工超薄蓝宝石晶片的有效性。**方法** 通过多种方式得到具有不同表面高度差(高度差分别为 5.3、9.8、19.9、29.7 μm)的基盘, 利用层叠式夹持方法对超薄蓝宝石晶片进行夹持(厚度 0.17 mm)并进行双平面加工, 获得不同高度差下的工件平面度。分别采用层叠式夹持方法及石蜡粘接的方法对超薄蓝宝石晶片进行双平面加工, 通过对比实验验证层叠式夹持方法的有效性。**结果** 在 4 种不同表面高度差下加工的超薄蓝宝石晶片, 其平面度随着高度差的增大而增大, 但其增大的趋势远小于基盘平面度变化的趋势。层叠式夹持方式及石蜡粘接方式均可实现超薄蓝宝石的双平面加工, 两者相差较小, 层叠式夹持方式最终可获得表面粗糙度 $R_a=1.4\text{ nm}$ 、平面度 $PV=0.968\text{ }\mu\text{m}$ 的光滑表面。**结论** 基盘表面高度差应不低于超薄蓝宝石晶片的目标平面度, 层叠式夹持方式在加工效果上与石蜡粘接方式相当, 但单位时间内的加工效率高于石蜡粘接方式, 具有较好的工程应用前景。

关键词: 层叠式; 超薄蓝宝石; 双平面加工; 平面度; 抛光

中图分类号: TG356.28 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2021)05-0340-08

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2021.05.038

Experimental Research on Double-sides Processing of Ultra-thin Sapphire Wafer Based on Layer Stacked Clamping

CHEN Zhi-xiang¹, YUAN Ju-long¹, HANG Wei¹, WANG Qin-feng², XU Liang¹, LYU Bing-hai¹

(1.Ultra-precision Machining Center, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China;

2.TDG Holding Co., Ltd, Haining 314412, China)

ABSTRACT: The purpose is to study the influence of the height difference of the substrate surface on the flatness of the workpiece and determine the double-sides processing effectiveness of ultra-thin sapphire wafers. Obtain the different height

收稿日期: 2020-06-22; 修订日期: 2020-07-06

Received: 2020-06-22; Revised: 2020-07-06

基金项目: 浙江省公益技术研究项目(LGG19E050021); 国家自然科学基金项目(51575492, 51775508)

Fund: Supported by Zhejiang Province Commonweal Technology Research Project (LGG19E050021), National Natural Science Foundation of China (51575492, 51775508)

作者简介: 陈芝向(1990—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为精密与超精密加工技术。

Biography: CHEN Zhi-xiang (1990—), Male, Doctoral candidate, Research focus: precision and ultra-precision matching technology.

通讯作者: 袁巨龙(1962—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为精密与超精密加工技术。邮箱: jlyuan@zjut.edu.cn

Corresponding author: YUAN Ju-long (1962—), Male, Doctor, Professor, Research focus: precision and ultra-precision matching technology. E-mail: jlyuan@zjut.edu.cn

引文格式: 陈芝向, 袁巨龙, 杭伟, 等. 基于层叠式夹持超薄蓝宝石晶片双平面加工实验研究[J]. 表面技术, 2021, 50(5): 340-347.

CHEN Zhi-xiang, YUAN Ju-long, HANG Wei, et al. Experimental research on double-sides processing of ultra-thin sapphire wafer based on layer stacked clamping[J]. Surface technology, 2021, 50(5): 340-347.

differences of baseplates with different surfaces (height difference of 5.3 μm , 9.8 μm , 19.9 μm , 29.7 μm) through various methods. By using the layer stacked clamping to clamp the ultra-thin sapphire wafer (thickness 0.17 mm) and perform double-sides processing, thus obtaining the flatness of the workpiece under different height differences. The two-layer processing of ultra-thin sapphire wafers is carried out by using the layer stacked clamping method and paraffin bonding method respectively, and the effectiveness of the layer stacked clamping method is verified through comparative experiments. The result shows that the flatness of ultra-thin sapphire wafers increases with the increase of height difference under four different surface height differences, but the increasing trend is far less than the base plate flatness change trend. Layer stacked clamping method and the paraffin bonding method can realize the double-plane processing of ultra-thin sapphire, and the difference between them is small. The layer stacked clamping method can finally obtain a smooth surface with surface roughness $R_a=1.4\text{ nm}$ and flatness $PV=0.968\text{ }\mu\text{m}$. Through experimental analysis and verification, it is proved that the height difference of the baseplate surface should smaller than the target flatness of the ultra-thin sapphire wafer. The layer stacked clamping method is equivalent to the paraffin bonding method in processing effect, but the processing efficiency per unit time is higher than the paraffin bonding method, which has a good engineering application prospect.

KEY WORDS: layer stacked; ultra-thin sapphire wafer; double-sides processing; flatness; polishing

蓝宝石单晶由于其优异的材料性能，是 LED 衬底的主要材料之一^[1-3]。平面度对于降低光的散射损耗和提高发光效率十分重要，因此平面度在 LED 衬底制备行业是关键技术指标之一^[4]。通常采用双平面研磨及单平面化学机械抛光的方法来获得高表面质量、高尺寸精度以及低亚表面损伤的蓝宝石表面^[5-6]。

蓝宝石晶片的平坦化多采用双平面研磨技术，然而随着市场的发展，对蓝宝石晶片的需求量急剧增加，蓝宝石材料的难加工特性使得众多国内外学者更多地关注于如何提升蓝宝石晶片的双平面研磨效率^[7-9]，研究更高效的固结磨盘双平面研磨技术^[10-13]，及工艺参数优化对蓝宝石晶片双平面抛光的影响^[14-15]。然而，蓝宝石晶棒的产能亦是限制蓝宝石产业扩大的重要因素，在有限的晶棒产能下，超薄蓝宝石晶片的超精密加工则显得尤为重要。

双平面抛光是加工超薄蓝宝石晶片的首选加工方法，目前适用于双平面加工技术的夹持方式主要有：游星轮保持架、无蜡垫^[16]以及石蜡粘接。2 英寸超薄蓝宝石晶片的厚度在 0.2 mm 以下，双平面抛光设备采用的游星轮保持架由于强度及刚度不足，极易发生跑片、碎片，严重制约加工成品率。无蜡垫采用具有微孔结构的聚氨酯材料通过液体膜吸附的作用夹持工件^[17]，但其吸附材料易磨损，制作成本较高^[18]。石蜡粘接方式具有加工精度高、残余变形小等优点，但其加热、粘结、剥离及清洗等工序很费时，且存在蜡污染^[19]。

针对上述问题，本文基于层叠式夹持方式，通过实验研究了基盘表面高度差对工件平面度的影响，采用对比实验验证了层叠式双平面抛光蓝宝石晶片的有效性。

1 层叠式夹持基本原理

层叠式夹持方式的基本原理如图 1 所示。在基盘

的上、下表面均固定两片限位片，并在限位片上开孔，使得工件能放置于限位片中，通过限位片与基盘表面的高度差实现对工件的径向限位。当对工件进行夹持时，在基盘与工件之间填充水滴，从而在两个表面之间形成水膜，实现对工件的法向吸附，通过法向吸附力对工件的轴向位移进行限位。两个粗糙表面间由于存在大量的空气介质^[20]，在不施加外力而相互接触时，表面间发生真实接触的区域产生以范德华力及毛细作用力为主的吸附力^[21-22]，由于毛细力受空气湿度的影响较大，当湿度较低时，接触区域的作用力以范德华力为主^[23]；受到表面粗糙度的影响，真实接触面积远小于表观接触面积^[24-26]，因此范德华力对工件的作用力极小，表面间的吸附力远小于工件的自重，工件无法被可靠地吸附在基盘表面。当向两个表面间注入液体，形成液体膜后，工件与基盘间的空气被液体

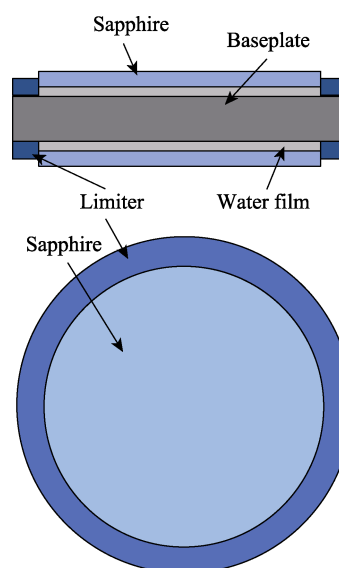


图 1 层叠式夹持原理

Fig.1 Principle of layer stacked clamping

膜排出,此时两表面间的吸附力以毛细力为主^[27-29],其所形成的作用力大于工件的自重,可在法向上将工件吸附于基盘表面。限位片将工件的径向移动进行限位,使得工件被牢固地夹持在夹具上,此时,工件与基盘间形成“工件-基盘-工件”的层叠式夹持方式,工件厚度在基盘的作用下被当量增厚,可被普通行星轮夹持,用于超薄平面晶片的双平面研磨抛光。

2 基盘高度差对工件的影响分析

晶片的平面度定义为晶片厚度相对于参考平面的变化^[30],晶片的平面度可间接表征晶片 Bow 值及 Warp 值,因此本文采用平面度来表征工件的加工精度。为研究层叠式夹持方式下工件平面度与基盘高度差之间的关系,本文选择不同高度差条件下的基盘进行加工实验。首先将基盘加工至较好的平面度状态,然后采用砂纸打磨等方式调整基盘表面高度差,根据课题组前期的研究经验,分别选择高度差为 5.3、9.8、19.9、29.7 μm 。图 2 为采用千分表测量的不同高度差下的基盘高度分布。

加工设备采用 6B 型行星式双平面抛光机,盘面尺寸为 $\phi 380\text{ mm}$,实验装置如图 3a 所示,层叠式夹具

如图 3b 所示。双平面抛光中太阳轮转速为 20 r/min,下盘转速为 34 r/min,上盘转速为 -24 r/min,齿圈转速为 0 r/min。选用质量分数为 5% 的硅溶胶溶液作为抛光液, pH 值为 12.2,抛光液流量为 25 mL/min。加工对象为 0.17 mm 厚度的 C 向 2' 蓝宝石抛光片,加工压力为每片 19.74 kPa,抛光片的初始平面度为 2 μm 左右,加工时间为 3 h,通过长时间的加工来观测基盘平面度对蓝宝石晶片平面度的影响。

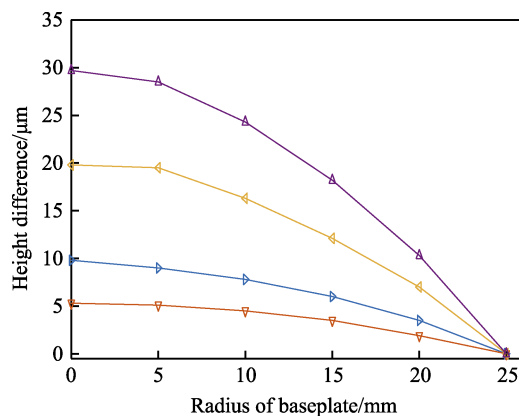


图 2 基盘表面高度差分布

Fig.2 Distribution of height difference on substrate surface



a 双平面抛光机



b 层叠式夹具

图 3 层叠夹持夹具及双平面加工设备

Fig.3 Layer stacked fixture and double-sides polishing equipment: a) double-sides polishing machine, b) layer stacked fixture

根据上述实验条件连续加工蓝宝石晶片 3 h 后,蓝宝石晶片的平面度如图 4 所示。图 5 为基盘高度差与蓝宝石晶片平面度变化的柱状图。从图 4 及图 5 中可以看出,蓝宝石晶片的平面度随着基盘高度差的增大而增大,但其增大的趋势远小于基盘平面度变化的趋势。较典型例子为图 4d 所示工件平面度,该基盘平面度为在初始修平状态下对基盘表面进行人为打磨而成,其为中间凸起结构,由于基盘表面为非理想平面,当工件被基盘吸附时,工件与基盘表面相贴合,在加工时随着工件的运动将进一步复制基盘的面形。同时工件在夹具内发生自转,工件自转亦会进一步促

使工件复制基盘的面形。图 6 为工件受到抛光垫施加的反向作用力示意图(红色箭头),抛光垫具有一定的弹性,当抛光垫受到施加的压力时,由于超薄蓝宝石晶片的厚度较薄,在外力作用下更易发生变形,故抛光垫挤压超薄蓝宝石晶片向基盘表面变形,形成中间较为凸起的结构。抛光时,中间凸起结构与抛光垫之间的相互作用力更大,从而导致在同等加工条件下具有更大的材料去除率。加工完成取下蓝宝石晶片时,由于挤压力的消失,蓝宝石晶片发生回弹,使得在测量时出现中间内凹的现象。因此,为保证加工质量,基盘的平面度应不低于超薄蓝宝石晶片的目标平面度。

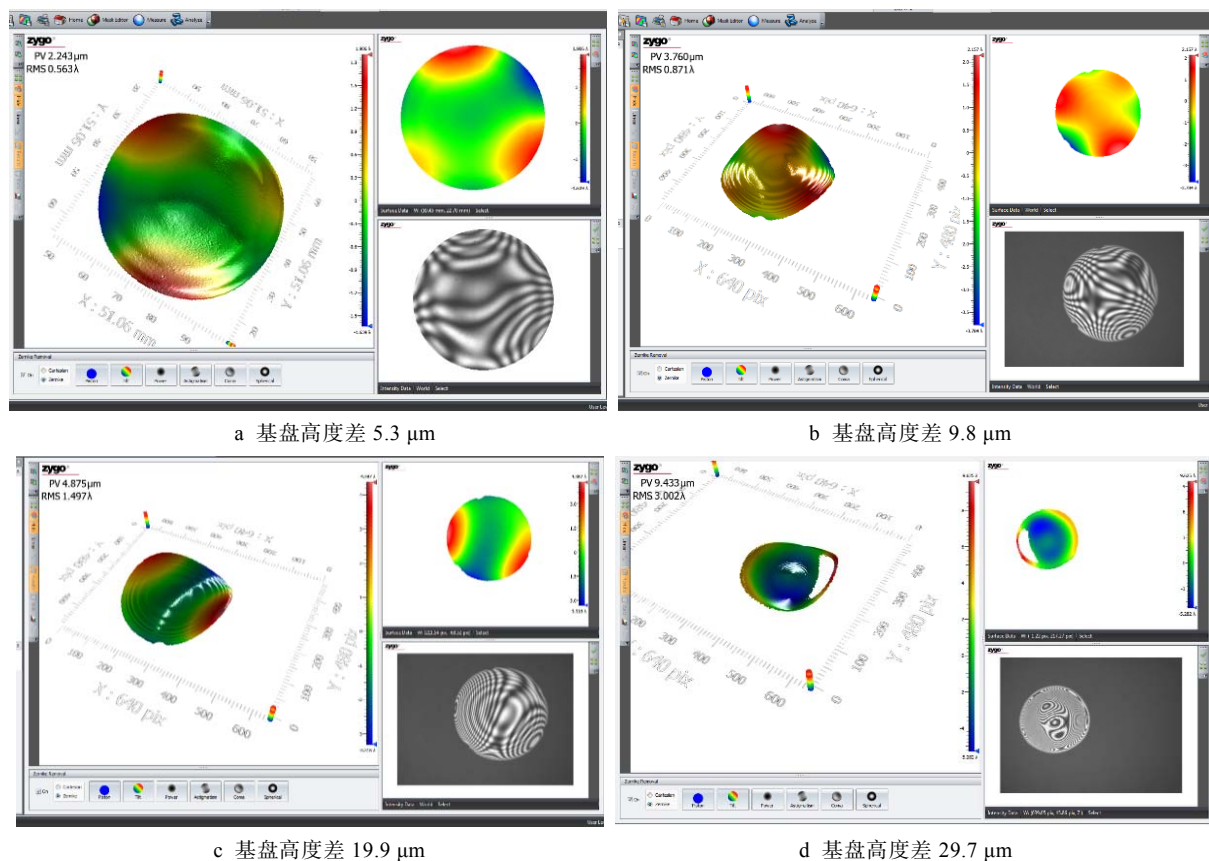


图 4 不同基盘平面度下工件平面度变化

Fig.4 Variation of workpiece flatness under different substrate flatness: a) height difference of baseplate is 5.3 μm , b) height difference of baseplate is 9.8 μm , c) height difference of baseplate is 19.9 μm , d) height difference of baseplate is 29.7 μm

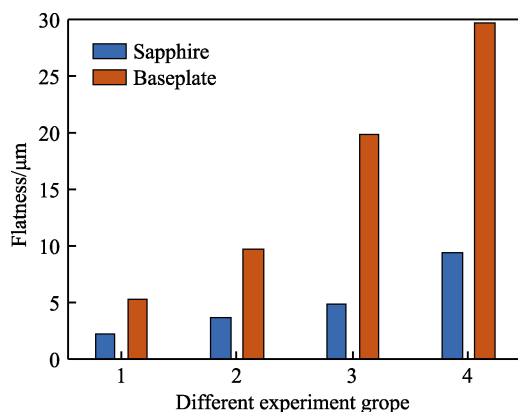


图 5 工件平面度与基盘高度差变化图

Fig.5 The change between workpiece flatness and baseplate height difference

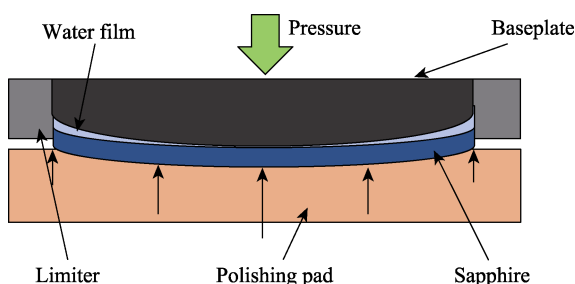


图 6 抛光垫对工件作用力示意图

Fig.6 The force of polishing pad on the workpiece

3 层叠式双平面加工实验

为了对比层叠式夹持与石蜡粘接的加工效果,采用双平面抛光方式对两种夹持方式下的超薄蓝宝石晶片进行加工,在抛光垫上放置 3 个行星轮保持架,将单批次加工的 6 个工件分为两组,分别为层叠式夹持及石蜡粘接方式。采用石蜡吸附方式时将层叠式夹具的限位片去除,在基盘表面均匀涂抹石蜡吸附蓝宝石晶片并调节基盘高度,使得两组实验在加工阶段的初始高度保持一致。

本实验采用 2' 超薄蓝宝石研磨片,厚度为 0.17 mm,限位片夹持厚度为 0.105 mm,具体实验参数如表 1 所示。采用 Sartorius 公司生产的 MSE225S-ICE-DU 精密天平测量蓝宝石晶片的材料去除量,测量精度为 0.1 mg。根据测得的质量,计算单位时间内的材料去除高度以表征材料去除率。表面粗糙度则采用 Taylor Hobson 公司生产的接触式粗糙度仪,每隔 60 min 测量蓝宝石的材料去除率及表面粗糙度,测量点如图 7 所示,分别测量中心(点 1)以及半径 20 mm 上的 4 个点,每个晶片各个单点均测试 3 次,求其变化量并取均值。

变异系数 CV (Coefficient of Variation) 是概率分布离散程度的一个归一化量度,其定义为标准差与

平均值之比。为表征两种夹持方式下蓝宝石晶片表面粗糙度均匀性,通过对两组蓝宝石晶片各测试点的表面粗糙度求均值及标准差,并计算变异系数 CV 作为表面粗糙度均匀性表征参数。

表 1 抛光实验参数
Tab.1 Polishing experiment parameters

Name	Parameter	Name	Parameter
Sapphire	$\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ C direction	Upper plate/($\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$)	-24
Sapphire diameter/mm	$\phi 50.8$	Lower plate/($\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$)	34
Sapphire thickness/mm	0.17	Sun gear/($\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$)	20
Abrasive	SiO_2	Outer gear/($\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$)	0
Abrasive size/nm	80	pH of slurry	11
Clamp method	Layer stacked	Flow rate of slurry/($\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$)	25
	Paraffin bonding	Quality score of slurry/wt%	5
Pressure of each piece/kPa	31.6	Time/min	60
Clamping thickness/mm	0.102	Flatness of baseplate/ μm	0.988

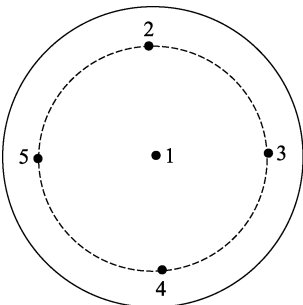


图 7 蓝宝石晶片表面测点示意图

Fig.7 Schematic diagram of measuring points on sapphire wafer surface

4 结果及分析

图 8 为对比实验中粗糙度随时间的变化曲线。从图 8 中可以看出,两者均表现为随着时间的增长而非线性降低,层叠吸附方式加工的蓝宝石表面粗糙度均值为 $Ra=1.48\text{ nm}$,石蜡粘接方式加工的蓝宝石表面粗糙度均值为 $Ra=2.08\text{ nm}$,均达到较好水平。

对比两种方式下蓝宝石晶片表面粗糙度的变化,其无论是在变化规律亦或是粗糙度变化量,两者均存

在较大的相似性,但从总体来说,层叠吸附方式下蓝宝石表面粗糙度优于石蜡粘接方式下的表面粗糙度。图 9 为采用白光干涉仪拍摄的蓝宝石晶片在层叠吸附及石蜡粘接方式下的表面形貌。而从加工均匀性来看,石蜡粘接方式最终获得的表面粗糙度的 $CV=0.1148$,而层叠吸附夹持状态下工件表面粗糙度的 $CV=0.0329$,其均匀性优于石蜡粘接方式。

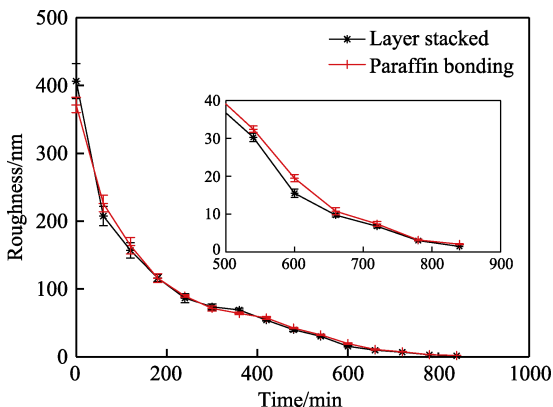


图 8 表面粗糙度随时间变化

Fig.8 The change of surface roughness with time

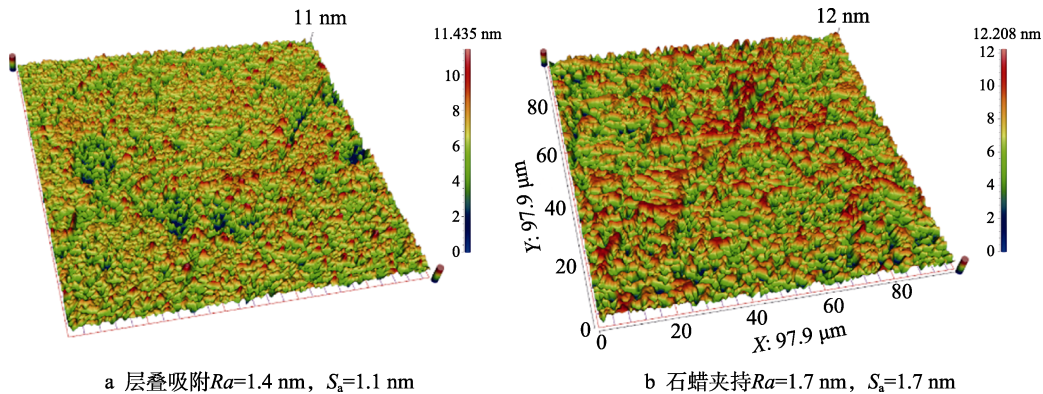


图 9 两种夹持方式表面粗糙度对比

Fig.9 Comparison of surface roughness between two clamping methods: a) the result of layer stacked clamping is $Ra=1.4\text{ nm}$, $S_a=1.1\text{ nm}$, b) the result of paraffin bonding is $Ra=1.7\text{ nm}$, $S_a=1.7\text{ nm}$

工件表面轨迹分布的均匀性直接决定了工件在加工中材料去除的均匀性,因此对工件表面的轨迹均匀性进行仿真分析。在分析两种夹持方式下工件的运动状态后,通过构建几何运动模型并采用轨迹线分布标准差的变异系数 CV 对轨迹线的分布均匀性进行定量评价。采用等间距、等角度的网格划分模式对工件表面进行划分,由此产生 N 个不同面积的扇形单元,每个扇形单元内的轨迹线长度之和与对应单元格面积之比为均匀性分析的样本参数,随后对 N 个单元格内的样本参数求标准差及均值,从而获得变异系数 CV 值。

根据实验参数对两种夹持方式下的工件进行

单磨粒加工轨迹仿真,仿真时间为 60 s,最终工件表面的轨迹分布结果如图 10 所示。从图 10 中可以看出,石蜡粘接方式的工件表面轨迹呈现放射性,且在近中心处存在圆环状轨迹线密集区;而层叠式夹持方式下的工件表面轨迹呈现螺旋向外展开状,相较于石蜡粘接方式,其轨迹线分布更加密集。对两个表面的轨迹线进行均匀性分析,结果表明石蜡粘接方式的轨迹均匀性参数 CV 为 0.3458,层叠夹持方式下工件的轨迹均匀性参数 CV 为 0.2704,可以看出在层叠式夹持方式下加工的蓝宝石晶片表面轨迹分布的均匀性优于石蜡粘接方式,与实验结果吻合。

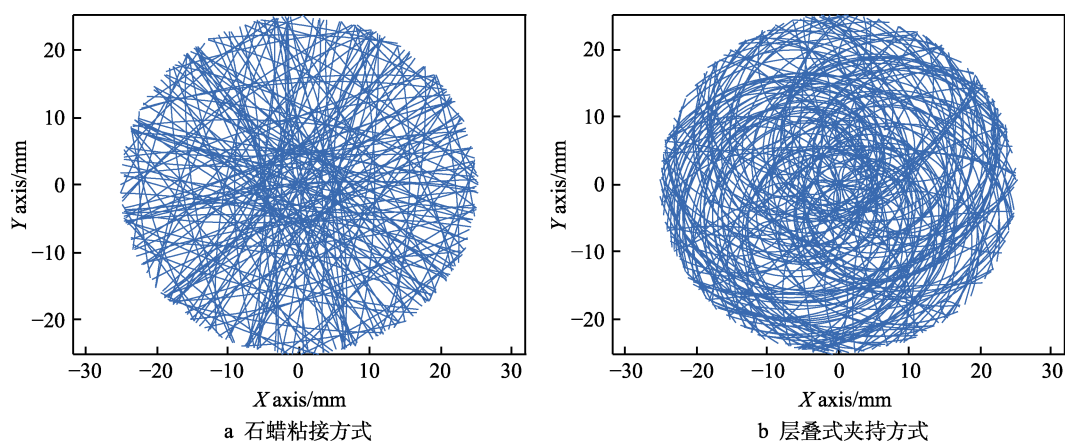


图 10 两种夹持方式下工件表面的轨迹分布

Fig.10 Trajectory distributions of workpiece surface under two clamping methods: a) paraffin bonding, b) layer stacked clamping

图 11 为两种夹持方式下蓝宝石材料去除率随时间的变化曲线。从图 11 中可以看出,在同等条件下,层叠吸附方式的材料去除率要略优于石蜡粘接的方式。由于基盘平面度保持在 $1\ \mu\text{m}$,因此由基盘引起的工件变形几乎可以忽略,故认为层叠吸附与石蜡粘接方式下蓝宝石晶片表面压力差异可以忽略。根据经典的普林斯顿方程可知,材料去除率与加工时的速度、压力以及系数有关,系数则与抛光液、磨粒粒径、

温度等参数有一定联系。在本实验中,压力以及系数均保持一致,因此认为材料去除率的差异表现为工件与抛光垫之间相对速度的差异,由于夹持方式的变化使得工件在加工时的运动状态发生变化,使得工件在两种夹持方式下与抛光垫之间的转速差存在差异,进一步导致两者材料去除率存在差异。

图 12 为不同夹持方式下蓝宝石晶片的对比图。两种夹持方式加工获得蓝宝石表面平面度分别为 $PV=0.968\ \mu\text{m}$ 以及 $PV=1.159\ \mu\text{m}$ 。从层叠式夹持方法的实验结果来看,有效地解决了超薄蓝宝石晶片双平面加工的难题,实现了超薄蓝宝石晶片的双平面高精度加工。

两组实验对比可以看出,层叠吸附方式在平面度及表面粗糙度均匀性等方面略优于石蜡粘接方式,均可实现高平坦化的蓝宝石晶片超精密加工。但从可操作性及单位时间效率角度来看,采用石蜡粘接方式加工的蓝宝石表面需进行重复的加热—粘接—加热—取片—洗蜡—清洗表面等流程,单组实验的非加工时间远大于层叠吸附方式。层叠吸附方式下,不存在重复的加热、洗蜡等过程,降低了额外的时间成本及设备成本,其单位时间内的加工效率远高于传动的石蜡粘接方式。

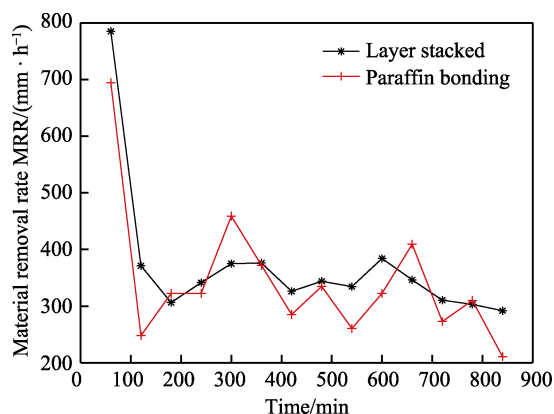
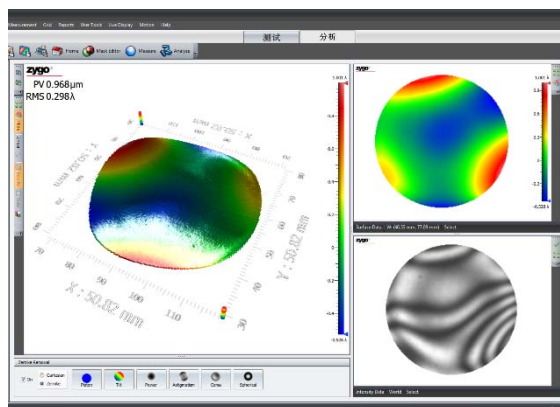
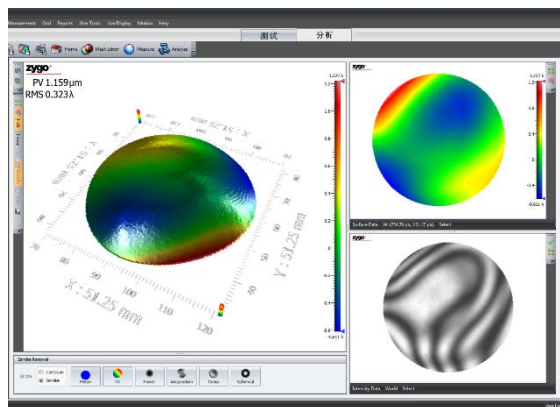


图 11 材料去除率随时间的变化曲线

Fig.11 Material removal rate curve



a 层叠吸附 PV=0.968 μm



b 石蜡夹持 PV=1.159 μm

图 12 不同夹持方式下蓝宝石晶片平面度对比

Fig.12 Comparison of flatness under different clamping methods: a) the result of layer stacked clamping is PV=0.968 μm, b) the result of paraffin bonding is PV=1.159 μm

5 结论

1) 在双平面加工方式下, 基盘的高度差将导致工件最终平面度的变化。基盘的高度差越大, 工件的平面度越差, 分析其原因在于超薄平面工件在长时间的外力作用下发生微小的变形, 同时由于加工时的受力变形使得中间区域与边缘区域产生压力差, 导致材料去除不均匀。

2) 通过石蜡粘接与层叠式夹持方式的双平面对比实验, 两者之间的粗糙度均值及平面度相差较小, 层叠式夹持方法略优于石蜡粘接。层叠式夹持方法获得的表面粗糙度变异系数优于石蜡粘接方式。

3) 层叠式夹持方法相较于石蜡粘接方式, 单位时间内的加工效率优于石蜡粘接方式, 实现了超薄蓝宝石的高精度双平面加工。

参考文献:

[1] NAKAMURA S, SENOH M, IWASA N, et al. High-brightness InGaN blue, green and yellow light-emitting diodes with quantum well structures[J]. Japanese journal of applied physics, 1995, 34(7): 797.

[2] NAKAMURA S, SENOH M, NAGAHAMA S I, et al. Characteristics of InGaN multi-quantum-well-structure laser diodes[J]. Applied physics letters, 1996, 68(23): 3269-3271.

[3] WANG T, BAI J, SAKAI S. Influence of InGaN/GaN quantum-well structure on the performance of light-emitting diodes and laser diodes grown on sapphire substrates[J]. Journal of crystal growth, 2001, 224(1-2): 5-10.

[4] HU Xiao-kai, SONG Zhi-tang, PAN Zhong-cai. Planarization machining of sapphire wafers with boron carbide and colloidal silica as abrasives[J]. Applied surface science, 2009, 255(19): 8230-8234.

[5] 董双阳, 颜志强, 刘祖耀, 等. 抛光液 pH 值、温度和浓度对蓝宝石抛光效率的影响[J]. 表面技术, 2017, 46(5): 261-265.

DONG Shuang-yang, YAN Zhi-qiing, LIU Zu-yao et al. Effect of slurry pH, temperature and concentration on removal efficiency of sapphire material[J]. Surface technology, 2017, 46(5): 261-265.

[6] 余青, 刘德福, 陈涛. 单晶蓝宝石衬底晶片的化学机械抛光工艺研究[J]. 表面技术, 2017, 46(3): 265-273.

YU Qing, LIU De-fu, CHEN Tao. Chemico-mechanical polishing technique of monocrystal sapphire substrate wafer[J]. Surface technology, 2017, 46(3): 265-273.

[7] 张克华, 文东辉, 鲁聪达, 等. 蓝宝石衬底双面研磨的材料去除机理研究[J]. 中国机械工程, 2008, 19(23): 2863-2866.

ZHANG Ke-hua, WEN Dong-hui, LU Cong-da, et al. Research on the material removal mechanism of dual-lapping sapphire substrate[J]. China mechanical engineering, 2008, 19(23): 2863-2866.

[8] 文东辉, 鲁聪达, 周兆忠. 蓝宝石衬底研磨加工中研磨盘材质的影响[J]. 机械工程学报, 2009, 45(2): 247-250.

WEN Dong-hui, LU Cong-da, ZHOU Zhao-zhong. Effect of plate materials on sapphire wafer lapping process[J]. Journal of mechanical engineering, 2009, 45(2): 247-250.

[9] 文东辉, 洪滔, 张克华. 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 Dong-hui, HONG Tao, ZHANG Ke-hua. Dual-lapping process for sapphire crystal[J]. Optics and precision engineering, 2009, 17(10): 2493-2498.

[10] 王洁, 袁巨龙, 吕冰海, 等. 大粒径 SiO₂ 磨粒固结磨具加工蓝宝石试验研究[J]. 表面技术, 2017, 46(4): 258-263.

WANG Jie, YUAN Ju-long, LYU Bing-hai, et al. Experimental study on processing of sapphire with bonded large particle size SiO₂ grain bonded grain bonded abrasive tool[J]. Surface technology, 2017, 46(4): 258-263.

[11] WANG L J, HU Z W, YU Y Q, et al. Evaluation of double-sided planetary grinding using diamond wheels for sapphire substrates[J]. Crystals, 2018, 8(7): 262.

[12] 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(1-2): 1340-

- 1344.
- [13] LEE T, JEONG H, KIM H, et al. Effect of platen shape on evolution of total thickness variation in single-sided lapping of sapphire wafer[J]. *International journal of precision engineering & manufacturing green technology*, 2016, 3(3): 225-229.
- [14] LI Z Y, DENG Z H, HU Y X. Effects of polishing parameters on surface quality in sapphire double-sided CMP[J]. *Ceramics international*, 2020, 46(9): 13356-13364.
- [15] MICHIO, UNED A, KOSUK E. Development of measurement device for polishing pad surface asperity on the upper platen of a double-sided polisher and its application for evaluation of polishing characteristics[J]. *Journal of the Japan Society for Abrasive Technology*, 2017, 56: 535-536.
- [16] 王贵臻, 萧耀民, 崔世伟, 等. 硅片无蜡抛光垫: 中国, CN87202507U[P]. 1987-05-23.
WANG Gui-zhen, XIAO Yao-min, CUI Shi-wei, et al. Wax-free polishing pad of silicon wafer: China, CN87202507U[P]. 1987-05-23.
- [17] 李铁英. 无蜡抛光新工艺[J]. *半导体技术*, 1987(1): 21.
LI Tie-yin. New wax-free polishing process[J]. *Semiconductor technology*, 1987(1): 21.
- [18] 陈振华, 陈芝向, 高涛, 等. 水膜吸附夹持方式在蓝宝石抛光中的可行性研究[J]. *机电工程*, 2017, 34(11): 1259-1263.
CHEN Zhen-hua, CHEN Zhi-xiang, GAO Tao, et al. Feasibility of water film adsorption positioning in sapphire polishing[J]. *Journal of mechanical & electrical engineering*, 2017, 34(11): 35.
- [19] 孙禹辉, 康仁科, 郭东明, 等. 化学机械抛光中的硅片夹持技术[J]. *半导体技术*, 2004, 29(4): 10-14.
SUN Yu-hui, KANG Ren-ke, GUO Dong-ming, et al. The mounting technology in chemical mechanical polishing (CMP)[J]. *Manufacturing technology*, 2004, 29(4): 10-14.
- [20] 黄晟, 杭伟, 陈芝向, 等. 不锈钢基板表面粗糙度对水膜吸附夹持的影响[J]. *表面技术*, 2019, 48(9): 97-103.
HUANG Sheng, HANG Wei, CHEN Zhi-xiang, et al. Effect of surface roughness of stainless-steel substrate on water-film adhesion[J]. *Surface technology*, 2019, 48(9): 97-103.
- [21] HIEP N H, THANH M D, HUY N D. Viscous-capillary traveling waves associated with classical and nonclassical shocks in van der Waals fluids[J]. *Nonlinear analysis real world applications*, 2018, 41: 107-127.
- [22] HARRISON J A. Detailed investigations of capillary and van der Waals forces in the adhesion between solids[J]. *atomic nuclei, of Physics* 2015, 235: 239.
- [23] 卿涛, 邵天敏, 温诗铸. 相对湿度对材料表面粘附力影响的研究[J]. *摩擦学学报*, 2006, 26(4): 295-299.
QING Tao, SHAO Tian-min, WEN Shi-zhu. Research on the effects of relative humidity on the material surface adhesion force[J]. *Tribology*, 2006, 26(4): 295-299.
- [24] YASTREBOV V A, ANCIAUX G, MOLINARI J F. From infinitesimal to full contact between rough surfaces: Evolution of the contact area[J]. *International journal of solids and structures*, 2015, 52: 83-102.
- [25] BEAMER B S, WALLEY K C, OKAJIMA S, et al. Changes in contact area in meniscus horizontal cleavage tears subjected to repair and resection[J]. *Arthroscopy*, 2017, 33(3): 617-624.
- [26] JACOBS T D B, MARTINI A. Measuring and understanding contact area at the nanoscale: A review[J]. *Applied mechanics reviews*, 2017, 69(6): 658.
- [27] RADOEV B P, PETKOV P V, IVANOV I T. Capillary bridges: A tool for three-phase contact investigation[J]. *Surface energy*, 2015: 23: 364.
- [28] PETKOV P V, RADOEV B, KLIMENT S, et al. Investigation of single and binary of "Sandwich" type convex liquid capillary bridges, stretched between two flat surfaces[J]. *Colloids and interfaces*, 2019, 3(4): 68.
- [29] PETKOV P V, RADOEV B P. Statics and dynamics of capillary bridges[J]. *Colloids and surfaces A: Physicochemical and engineering aspects*, 2014, 460: 18-27.
- [30] TILLI M, PAULASTO-KROCKEL M, PETZOLD M, et al. *Handbook of silicon based MEMS materials and technologies*[M]. Amsterdam: Elsevier, 2020.

(上接第 328 页)

- [24] SHARIFI Y, PAIK J K. Ultimate strength reliability analysis of corroded steel-box girder bridges[J]. *Thin wall struck*, 2011, 49: 157-166.
- [25] ZOU Y X, WANG B Z, JIANG Y Z, et al. Failure analysis of ultra-high strength bolt of circuit breaker[J]. *Procedia computer science*, 2019, 154: 124-129.
- [26] 熊娟, 郑兴文, 张文艳, 等. 西南地区某输油管道外腐蚀分析[J]. *表面技术*, 2014, 43(4): 59-63.
XIONG Juan, ZHENG Xing-wen, ZHANG Wen-yan, et al. Analysis on the external corrosion for an oil pipeline in southwest China[J]. *Surface technology*, 2014, 43(4): 59-63.
- [27] 徐秀清, 魏丹, 俞莹滢, 等. Cl^- 浓度对含盐污水中 $10^\#$ 碳钢腐蚀行为的影响[J]. *表面技术*, 2013, 42(5): 59-61.
XU Xiu-qing, WEI Dan, YU Ying-ying, et al. Influence of Cl^- concentration on the corrosion behavior of $10^\#$ carbon steel in saline wastewater[J]. *Surface technology*, 2013, 42(5): 59-61.
- [28] STRATMANN M. The atmospheric corrosion of iron steel[J]. *Metal odlew*, 1990, 16: 46-52.
- [29] 胥聪敏. X80 管线钢的土壤腐蚀行为研究[M]. 北京: 科学出版社, 2019.
XU Cong-min. Soil corrosion behavior of X80 pipeline steel[M]. Beijing: Science Press, 2019.
- [30] 王秀静. 金属材料大气环境早期腐蚀行为及锈层演化机制研究[D]. 北京: 机械科学研究总院, 2013.
WANG Xiu-jing. Research on the behaviors and mechanism of the rust layer evolution of the early stages of atmospheric corrosion for metals[D]. Beijing: General Institute of Mechanical Science, 2013.