

纯水介质下抛光单晶蓝宝石晶圆的反应去除机理

范梓琛¹,许永超¹,石洋¹,詹友基²,陈丙三²

(1. 福建理工大学 材料科学与工程学院,福建 福州 350118;

2. 福建理工大学 机械与汽车工程学院,福建 福州 350118)

摘要:采用反应分子动力学模拟的方法,研究了水溶液下SiO₂抛光蓝宝石过程中材料原子级别的反应去除机理,并结合抛光实验对比验证。结果表明:在反应过程中H₂O分子会吸附在蓝宝石表面,与蓝宝石的Al原子成键,形成Al—H₂O和Al—OH化学键,从而实现蓝宝石基体表面的“软化”,之后在磨粒机械作用下,工件的Al原子以Si—O—Al链的形式被去除。加工后的蓝宝石晶圆通过XPS检测,分析其表面成分,对磨屑进行TEM分析观察并计算原子能谱。结果表明:在加工蓝宝石的过程中, SiO₂和水溶液发生化学反应,生成包含Si—O—Al键连的硅酸铝盐(Al₂SiO₅)和水合氧化铝(AlOOH)组成的软质反应层,最终通过磨料的机械作用去除。

关键词:蓝宝石衬底;抛光;反应分子动力学;界面反应;材料去除机理

中图分类号:TH161;TG58

文献标志码:A

文章编号:2097-3853(2024)06-0554-06

Reaction removal mechanism of polished single crystal sapphire wafers in pure water medium

FAN Zichen¹, XU Yongchao¹, SHI Yang¹, ZHAN Youji², CHEN Bingsan²

(1. School of Material Science and Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China;

2. School of Mechanical and Automotive Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China)

Abstract: The atomic-level reaction removal mechanism of SiO₂ polishing sapphire in aqueous solution was studied by reactive molecular dynamics simulation, and verified by polishing experiments. Simulation results show that: in the reaction process, H₂O molecules will be adsorbed on the sapphire surface, and bonded with the Al atoms of sapphire, forming Al—H₂O and Al—OH chemical bonds, so as to achieve the “softening” of the surface of the sapphire substrate. Then, under the action of abrasive particles, the Al atoms of the workpiece are removed in the form of Si—O—Al chains. The surface composition of the processed sapphire wafers was analyzed by XPS, and the abrasive chips were observed by TEM analysis and the atomic energy spectrum was calculated. Experimental results show that there is a chemical reaction between SiO₂ and aqueous solution during the processing of sapphire, resulting in the formation of a soft reactive layer consisting of aluminum silicate containing Si—O—Al bonding (Al₂SiO₅) and hydrated aluminum oxide (AlOOH), which is ultimately removed by the mechanical action of the abrasive.

Keywords: sapphire wafers; polishing; reaction molecular dynamics; interfacial reaction; material removal mechanism

单晶蓝宝石(α -Al₂O₃)因其具有优异的化学物理特性,已成为GaN基发光二极管领域广泛使用的晶圆材料之一。蓝宝石衬底的表面质量直接

影响着GaN薄膜的沉积生长品质,化学机械抛光(CMP)是实现蓝宝石全部或局部平坦化的重要手段^[1-3]。目前对于蓝宝石CMP的研究主要以

收稿日期:2024-07-19

基金项目:国家自然科学基金面上项目(52275413);福建省自然科学基金(2023J01342);宁德市产学研合作项目(宁市科[2021]57)

第一作者简介:范梓琛(2000—),男,河北石家庄人,硕士研究生,研究方向:硬脆性材料精密加工。

通信作者:许永超(1986—),男,河南新乡人,副教授,博士,研究方向:高效精密加工技术与装备。

实验研究为主,但在这一过程中对于化学机制和材料去除形式的解释还不够明确。Yin 等^[4]使用 SiO₂ 磨料抛光蓝宝石晶圆,指出 SiO₂ 磨粒与单晶蓝宝石在抛光过程中存有活化能并且发生了固相化学反应。赵之琳等^[5]通过抛光实验与量子化学参数的仿真计算研究了抛光后工件表面的化学组成。Zhou 等^[6]在研究超声震动辅助化学机械抛光蓝宝石的抛光机制时,发现蓝宝石在 CMP 过程中与 H₂O 发生水合反应,生成水合氧化铝 (Al₂O₃ · H₂O) 或三水合氧化铝 (Al(OH)₃)。Xu 等^[7]探究了工艺参数对平面化机理的影响。由于 CMP 的反应过程较复杂,无法对其表面反应直接检测,导致目前对其反应机制的理解非常有限。

本文基于 ReaxFF 力场反应分子动力学方法,通过建立在水环境下 SiO₂ 磨粒划擦蓝宝石衬底的分子动力学仿真模型,讨论了 SiO₂ 磨粒在蓝宝石材料去除过程中的化学反应和机械去除作用。通过添加水环境,并使其在抛光过程中参与反应,模拟了加工过程中界面微观化学反应过程。并结合 SiO₂ 磨粒半固结抛光蓝宝石晶圆的实验结果,进一步验证其反应去除机理,得出反应去除模型。

1 仿真设计

1.1 模型建立

系统模型由单晶蓝宝石、水溶液和 SiO₂ 磨粒 3 部分组成。通过使用 Amorphous Cell 软件包构建模型并使用 CVFF 力场进行能量最小化处理,使势能达到稳定状态的同时,优化空间几何结构^[8]。模型的建立过程如下:

(1) 单晶蓝宝石为六方晶格结构,如图 1 所示。蓝宝石由铝离子 (Al³⁺) 和氧离子 (O²⁻) 组成,它们分别与 6 个和 4 个相邻离子配位。仿真模型的加工面为 C 面,表面晶面指数为 (0001),并保证其原子排列呈周期性,蓝宝石工件分为约束刚性层和非刚性层。

(2) 通过使用 Amorphous Cell 软件包构建水溶液体系,设置 H₂O 分子数量为 100。

(3) 磨粒为非晶 SiO₂, 分为可移动刚性层和非刚性层。

模型总体采用多层板对板结构,分为 5 层:(1) 底部 SiC 衬底原子的刚体层,在整个模拟中被约束为静止;(2) 自由 SiC 衬底层,其原子在模拟中被允许动态移动;(3) 蓝宝石基体和 SiO₂ 表

面界面处的 H₂O 分子;(4) 在模拟中允许原子动态移动的自由 SiO₂ 层;(5) 可横向移动的非晶 SiO₂ 的刚体层。该模型旨在模拟抛光过程中磨粒、介质和工件的微观反应和划擦过程。单晶蓝宝石抛光模型示意图如图 2 所示。

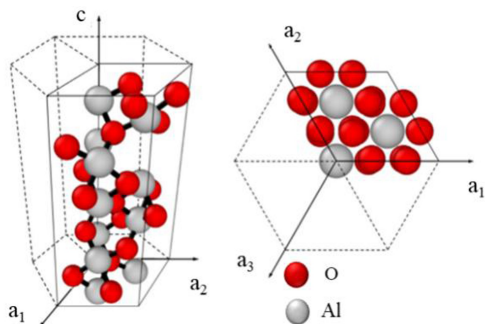


图 1 蓝宝石的六边形晶胞和原子结构

Fig.1 Hexagonal cell and atomic structure of sapphire

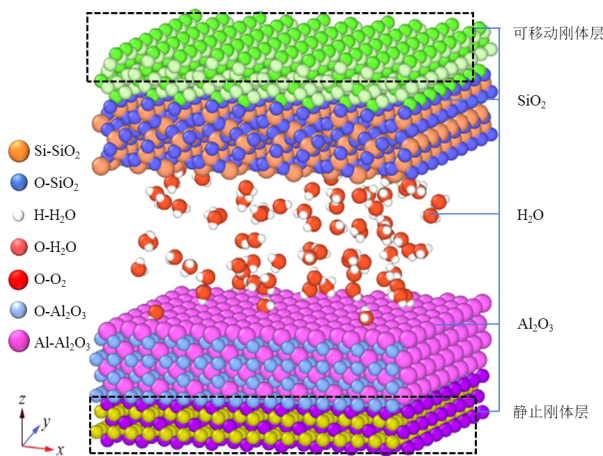


图 2 单晶蓝宝石抛光模型示意图

Fig.2 Schematic diagram of single crystal sapphire polishing model

1.2 模型仿真

在建立的水环境下, SiO₂ 磨粒划擦蓝宝石的模拟中参考了 Ostadhosseine 等人^[9]开发的 ReaxFF 立场文件, 主要包含 Si、O、H、Al 元素, 该力场适用于本抛光模型的同时, 包含较少的其他无关元素, 对仿真结果产生的影响相对较小。

采用 lammmps 并行模拟器仿真计算, 利用可视化软件 Ovito 对模拟结果进一步分析^[10]。仿真为 NVT 系综, 边界条件设为 ppf。分为以下几个阶段:(1) 在温度为 300 K 的情况下, 模拟蓝宝石、SiO₂ 与水溶液之间发生界面反应的化学反应过程;(2) 将整个系统集成, 对 SiO₂ 磨粒的刚性可移

动层施加 5 GPa 的压力向 z 轴负方向移动,直至蓝宝石基底压力达到设定值;(3)将 SiO_2 的可移动刚性层以 60 m/s 的速度沿 x 轴负方向运动,使其在蓝宝石基体表面滑动。

2 仿真结果与讨论

2.1 系统总势能

提取系统的总势能参数绘制如图 3 所示的势能变化图,观察模拟过程中基底材料和磨粒在水环境中的反应情况。在初始阶段,系统的总势能迅速降低 364.8 eV,这是由于大量 H_2O 分子分别与基底材料和磨粒发生了化学反应,吸收大量系统势能。之后由于磨粒逐渐压入基底表面,两者都发生了一定程度的挤压变形,原子受到挤压而靠近,相互之间的排斥力增加,系统的总势能也开始迅速增加。而随着磨粒下压至指定深度,之前发生弹性形变的原子逐渐恢复,晶格吸收的能量有一部分释放了出去,同时 H_2O 分子与基底材料、磨粒发生新的化学反应,导致划擦后系统势能大幅度下降。最后磨粒沿着设定方向划擦,在这

个阶段不断有化学键的断裂与重组,最终系统总势能呈波浪式稳定。

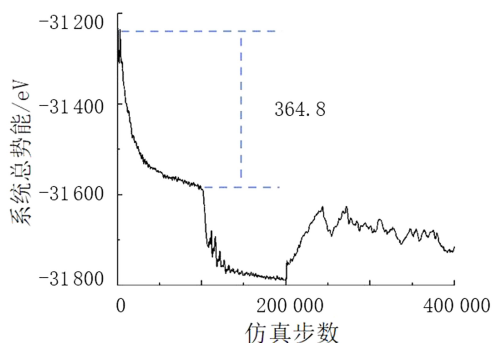


图 3 系统总势能变化图

Fig.3 Change in total potential energy of the system

2.2 界面化学反应分析

在构建划擦模型之前,模拟了 Al_2O_3 、 SiO_2 分别与 H_2O 分子之间的反应,以获得钝化的 Al_2O_3 和 SiO_2 表面。图 4 为原始界面形貌和反应结束后的界面形貌,由图 4 可见,经过反应后,蓝宝石基体表面的原子结构发生变化,表面原子原始的整齐排列结构被打乱,使基体原子在被划擦时更易去除。

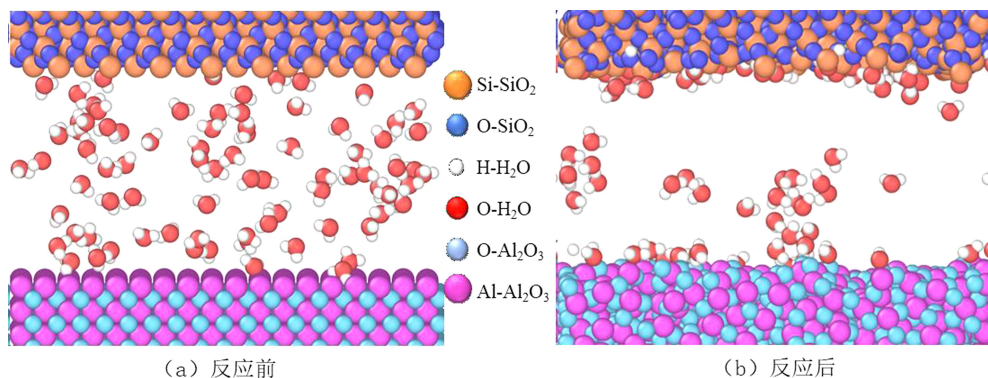


图 4 界面化学反应前后的蓝宝石形貌

Fig.4 Sapphire morphology before and after interfacial chemical reaction

反应结束后观察 SiO_2 和 Al_2O_3 表面可看出,蓝宝石表面产生大量的 $\text{Al}-\text{H}_2\text{O}$ 和 $\text{Al}-\text{OH}$ 结构,主要由 H_2O 分子的吸附以及解离反应产生,其中 $\text{Al}-\text{O}$ 键的平均键长为 170 pm。如图 5(a) 所示,游离的 H_2O 分子移动到靠近蓝宝石基底表面时,直接吸附于 Al 原子上,形成 $\text{Al}-\text{H}_2\text{O}$ 结构。另一种结构如图 5(b) 和图 5(d) 所示, H_2O 分子解离为 $-\text{H}$ 和 $-\text{OH}$,游离的 $-\text{OH}$ 结合 Al_2O_3 中的 Al 形成 $\text{Al}-\text{OH}$ 键,而游离的 $-\text{H}$ 结合 SiO_2 中的一个 O 原子形成 $\text{Si}-\text{OH}$ 键。而在蓝宝石基体表面 $\text{Al}-\text{OH}$ 和 $\text{Al}-\text{H}_2\text{O}$ 结构的形成,

使得 Al_2O_3 表面部分原子的性质发生改变,表面原子之间的化学键被削弱,在宏观上可以理解衬底材料的表面发生化学反应被“软化”。

图 5(c) 和图 5(d) 为 SiO_2 磨粒与 H_2O 分子发生化学反应后的表面状态,磨粒存在大量 $-\text{OH}$ 官能团和 $\text{Si}-\text{H}_2\text{O}$ 结构,可以认为化学反应使磨粒模型更加接近实际的纳米 SiO_2 磨粒的表面结构,其中 $\text{Si}-\text{O}$ 键的平均键长为 166 pm。通过分析其反应过程发现, SiO_2 磨粒表面 $-\text{OH}$ 官能团的形成有两种方式:(1) SiO_2 磨粒 $\text{Si}-\text{O}$ 键中的 O 与 H_2O 分子中解离出的 H 原子反应生成 $\text{Si}-$

OH;(2) Si—O 键中的 Si 与 H_2O 分子解离出的—OH 反应生成 Si—OH 结构。

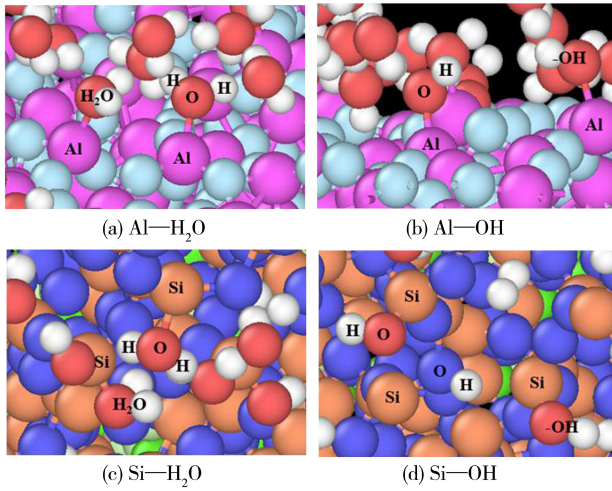


图5 界面化学反应后的表面原子结合键

Fig.5 Surface atomic bonding after interfacial chemical reaction

2.3 材料去除过程分析

在上述界面化学反应的基础上,分析磨粒划擦蓝宝石过程中化学键的形成与断裂情况,如图6所示。由图6(a)和图6(b)可见,在磨粒压到基体表面后, SiO_2 磨粒通过划擦使 Al_2O_3 的一个 O 原子和相连的 Al_2O_3 的 Al 原子断开,断开后欠配位的 O 原子与磨粒中的一个 Si 原子相连接形成 Si—O—Al 键。在化学反应阶段,如图6(c)和图6(d)所示, Al_2O_3 中的 Al 原子与游离的 H_2O 分子中的羟基—OH 结合,形成 Al—OH 结构,随着磨粒的划擦,Al—OH 中羟基的 H 质子脱离 O 原子,而磨粒中的 Si 原子逐渐靠近脱去 H 原子后欠配位的 Al—O 结构,相连形成了 Al—O—Si 键。之后随着磨粒的持续划擦,机械力通过 Al—O—Si 键传递,最终破坏了表面原子间的化学键,造成材料的去除。

基底表面原子的去除并不只由一个 Al—O—Si 键的拉伸造成,而是需要多个 Al—O—Si 键的“接力”。随着磨粒的持续划擦,通过传递的机械力使 Al—O—Si 键连在 Si—O 键或 O—Al 键处断裂,然后重新与磨粒的其他原子结合,形成新的 Al—O—Si 键,如此重复作用叠加,最终导致基底表面原子完全脱离。

从宏观层面上看,Al—O—Si 键的形成对应了以磨粒、水溶液和基体材料之间发生反应为主

的化学作用,而磨粒的划擦移动传递剪切力对应了其机械作用,磨粒的化学和机械作用共同造成了材料去除。

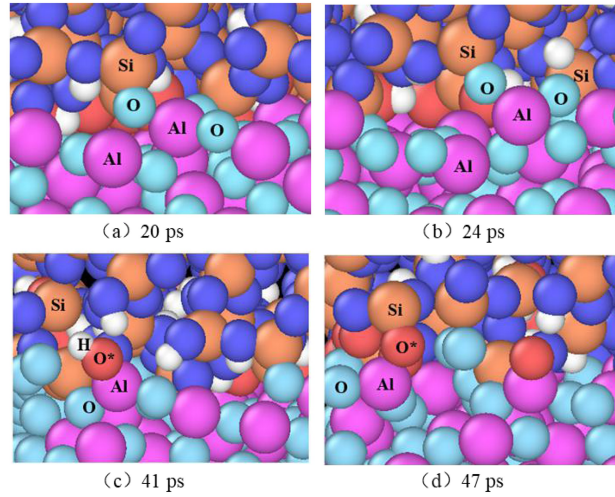


图6 微观层面的原子去除机理

Fig.6 Atom removal mechanism at microscopic level

3 蓝宝石晶圆抛光实验

采用单晶蓝宝石晶片(C向),在 UNIPOL-1200S 型抛光机上实验。以不饱和树脂为基体, SiO_2 为磨粒($w_{SiO_2} = 5\%$),通过搅拌混合、涂敷刮平、固化成型等工序制备出磨料分散均匀的半固结柔性抛光垫。抛光前,将蓝宝石晶圆在去离子水和无水乙醇中多次超声波清洗,去除其表面的污染物和天然氧化物。抛光参数设置为:压力 5 kg,工件转速 60 r/min,抛光垫转速 120 r/min,抛光时间 2 h。抛光过程中仅使用去离子水作为抛光液。抛光过程如图7所示。

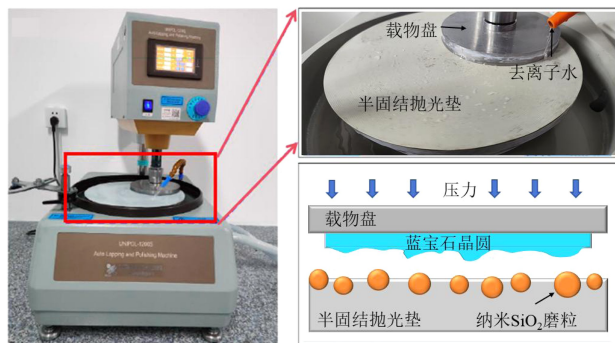


图7 抛光平台示意图

Fig.7 Schematic diagram of polishing process

实验结束后,分析蓝宝石晶圆的材料去除机理,使用 200 目的铜网在抛光液中打捞收集磨屑,

即可完成用于 TEM 观察的磨屑样品制备。应用装配 EDS 的 JEM-2100 型 TEM, 在加速电压为 200 kV 的条件下, 观察磨屑形貌、元素组成和衍射花样。为进一步研究蓝宝石晶圆在半固结抛光过程中的化学反应机理, 利用 XPS (ESCALAB 250X1) 表征抛光后蓝宝石晶圆的表面元素和存在形态。

4 实验结果与讨论

4.1 磨屑分析

图 8 为抛光后蓝宝石磨屑的透射电子显微镜形貌图和衍射图。由图可见, 用去离子水抛光液加工后的蓝宝石磨屑呈不规则块状。HRTEM 观察到, 磨屑表面没有晶格条纹, SEAD 图中也没有明显的衍射点, 表明磨屑已经完成了非晶态转变。同时结合加工条件对磨屑的 EDS 能谱进行分析。

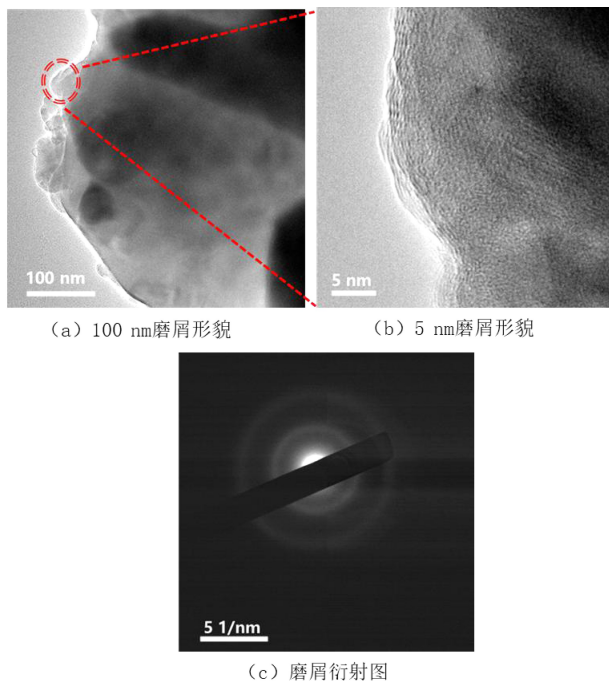


图 8 蓝宝石晶片抛光后磨屑的形貌图和衍射图

Fig.8 Morphology and diffractogram of abrasive chips after sapphire wafer polishing

图 9 为磨屑的 EDS 能谱图, 发现在磨屑中除了 Al 和 O 元素外, 还有 Si 元素的存在, 说明在抛光过程中可能有 Al—Si 化合物的生成。由此可见, 在以去离子水作为抛光液的半固结磨料加工下, 蓝宝石晶圆加工过程中的去除方式为以化学腐蚀为主的反应去除, 表明加工过程中蓝宝石表面有化学反应的发生。

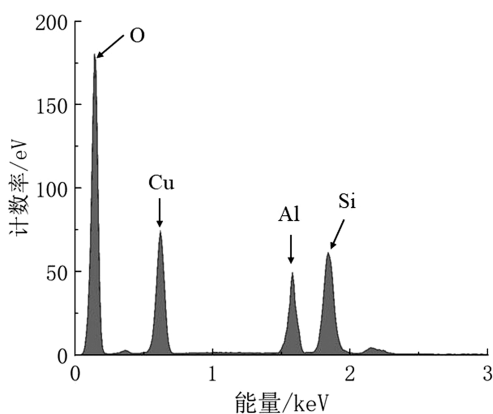
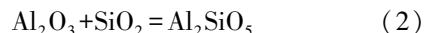


图 9 蓝宝石晶片抛光后磨屑的 EDS 能谱图

Fig.9 EDS energy spectra of abrasive chips from sapphire wafers after polishing

4.2 蓝宝石表面成分分析

用 XPS 分析加工后蓝宝石晶圆表面的物相组成, XPS 光谱如图 10 所示。图 10(a) 显示了加工后晶圆表面元素的全谱, 发现了原子比为 0.64% 的硅 (Si)。相对应的 Si 2p 光谱如图 10 (b) 所示, 结合能位于 99.51 eV 处的峰对应于 SiO_2 , 位于 102.13 eV 处的峰对应于 Al_2SiO_5 。可以得出, 高活性 SiO_2 磨料在抛光过程中与蓝宝石晶圆发生固相反应, 在晶圆表面生成了含有 Al_2SiO_5 的软质层, 因而在图 10(a) 中观察到单质 Si。图 10(c) 为 Al 2p 光谱, 在 Al 2p 光谱中位于 73.77 eV 的峰对应于 Al_2O_3 , 而位于 74.67 和 75.63 eV 的峰分别对应于 AlOOH 和 Al_2SiO_5 。可知, 蓝宝石在抛光过程中还产生了水合反应。综上所述, SiO_2 和水溶液在加工过程中与蓝宝石产生反应, 生成由 Al_2SiO_5 、 AlOOH 组成的软质反应层, 最终通过磨料的机械作用去除, 以获得超光滑表面。同时基于 XPS 光谱, 提出了抛光过程中的反应方程:



4.3 蓝宝石晶圆抛光的材料去除模型

蓝宝石晶圆抛光加工的去除模型如图 11 所示, 分为两个阶段。

化学腐蚀阶段: 通过化学反应, 降低原有的硬质材料表面硬度, 在蓝宝石晶圆表面有水合产物 AlOOH 和硅酸铝盐产物 Al_2SiO_5 形成, 将蓝宝石表面改性, 使得粗糙的表面具备材料去除的能力。

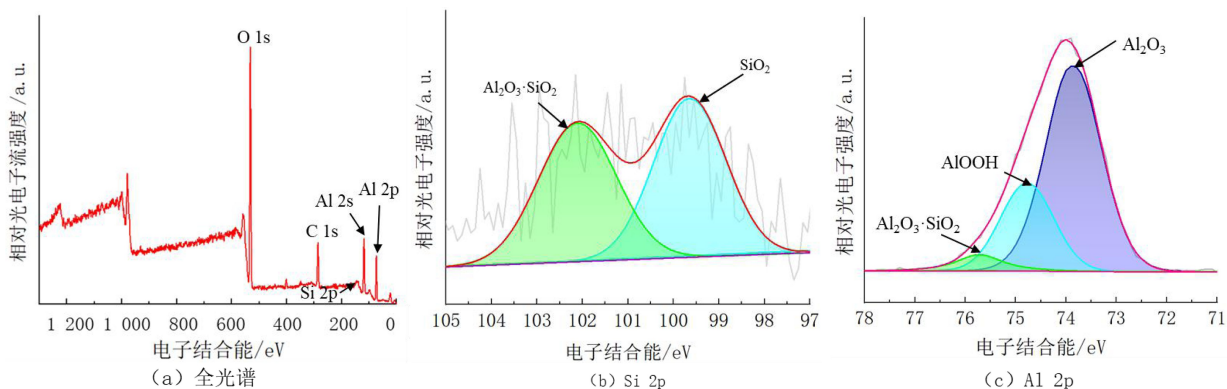


图 10 加工后蓝宝石晶圆表面的 XPS 光谱

Fig.10 XPS spectra of processed sapphire wafer surface

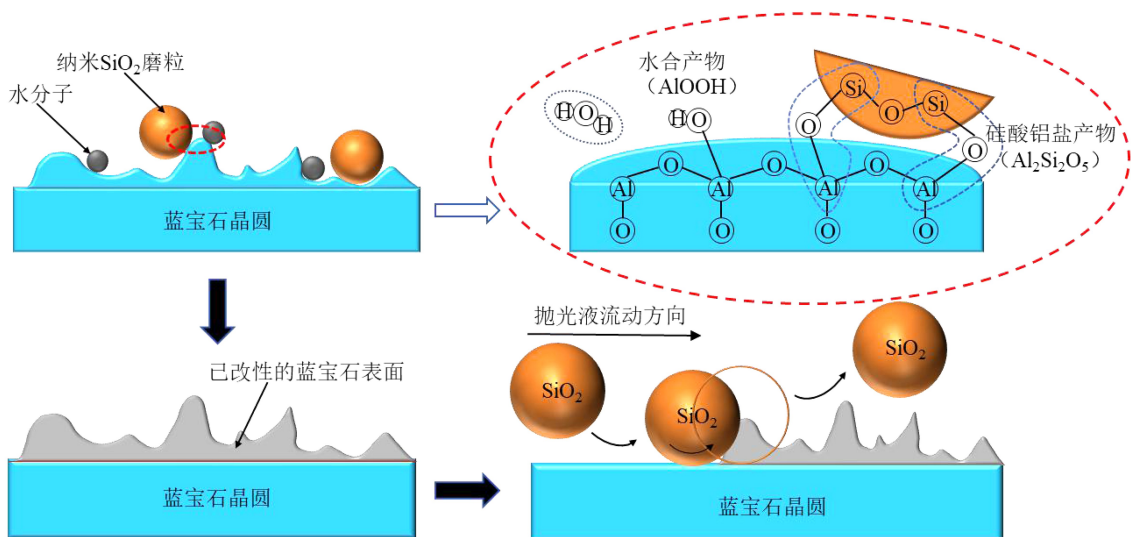


图 11 蓝宝石晶圆材料去除模型

Fig.11 Sapphire wafer material removal models

机械磨损阶段: 通过在加工过程中抛光液的不
断流动, 使加工对象与磨粒之间直接接触, 通过
Si—O—Al 键的键连和相对运动的作用, 对化学腐
蚀作用后具备材料去除能力的粗糙表面进行材料
去除。最终获得全局平坦化的蓝宝石表面。

5 结论

1) 仿真模型中的 H_2O 分子与蓝宝石基底和
 SiO_2 磨粒表面发生了化学反应。蓝宝石表面形
成了大量 Al— H_2O 和 Al—OH 结构, 其中包括由
 H_2O 分子吸附在蓝宝石表面原子上形成的 Al—
 H_2O 结构, 以及由于 H_2O 分子的解离反应产生
的游离羟基—OH 结合 Al_2O_3 中的 Al 形成的 Al—
OH 结构。 SiO_2 磨粒表面则通过与 H_2O 分子的 H

原子或者羟基—OH 反应生成 Si—OH 结构。

2) 分析了 SiO_2 磨粒在水环境划擦蓝宝石表
面的过程, 发现磨粒划擦使得蓝宝石表面 Al—O
键断裂或 Al—OH 结构脱 H 和 SiO_2 磨粒表面 Si
反应结合生成 Al—O—Si 键。通过多次 Al—O—Si
键的形成、断裂以及磨粒移动过程中, Al—O—Si
键向表面原子传递的剪切力, 最终造成表面原子
的去除。

3) 在半固结抛光实验中, 使用 TEM 对加工后
的磨屑分析, 得出蓝宝石晶圆加工过程中的去除方
式以为以化学腐蚀为主的反应去除, 在蓝宝石表面可
能有 Al—Si 化合物的产生。使用 XPS 表征了加工
后蓝宝石晶圆表面的物相组成, 结果发现 SiO_2 和
(下转第 566 页)

参考文献:

- [1] 杨博文,霍军周,张伟,等.服役结构超载荷实时预测方法的研究[J].东北大学学报(自然科学版),2022,43(4):541-550.
- [2] 肖汉斌,秦佳乐,祝锋,等.基于红外热像法的金属裂纹扩展研究[J].激光与红外,2023,53(1):64-69.
- [3] 张亚军,张欢耀,张云浩.金属材料疲劳裂纹扩展速率 Paris 模型中材料常数的相关性[J].材料开发与应用,2021,36(4):1-8.
- [4] 朱晔. TBM 刀盘三维裂纹扩展规律及其抗损伤设计[D].大连:大连理工大学,2019.
- [5] 王丁,曲传咏. TBM 刀盘裂纹损伤特性及疲劳可靠性研究[J].应用力学学报,2024,41(1):121-128.
- [6] SUN W, ZHU Y, HUO J Z, et al. Multiple cracks failure rule for TBM cutterhead based on three-dimensional crack propagation calculation[J]. Engineering Failure Analysis, 2018, 93: 224-240.
- [7] WANG D, QU C Y. Research on TBM cutterhead crack damage and fatigue reliability[J]. Applied Sciences, 2021, 11(5): 2111.
- [8] 凌静秀,孙伟,杨晓静,等.复杂应力状态下 TBM 刀盘裂纹应力强度因子分析[J].哈尔滨工程大学学报,2017,38(4):633-639.
- [9] LI J, ZHANG B, LYU D, et al. Fatigue reliability analysis of tunnelling boring machine cutterhead with cracks[J]. Engineering Failure Analysis, 2022, 141: 106669.
- [10] 刘建琴,郭晓,闫康伟,等. TBM 刀盘裂纹分析及止裂方案研究[J].铁道科学与工程学报,2022,19(11):3428-3438.
- [11] 吴勉. TBM 刀盘结构多裂纹扩展机理及寿命预测方法[D].福州:福建工程学院,2023.
- [12] DEMIR O, AYHAN A O, IRIC S, et al. Evaluation of mixed mode-I/II criteria for fatigue crack propagation using experiments and modeling[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2018, 31(7): 1525-1534.
- [13] 胡金花,宋凯,熊礼明.考虑修正平均等效应力强度因子的焊点缺陷疲劳寿命研究[J].中国机械工程,2020,31(6):740-745.

(责任编辑:陈雯)

(上接第 559 页)

水溶液在加工蓝宝石的过程中有化学反应的发生,生成由 $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5$ 、 AlOOH 组成的软质反应层,

最终通过磨料的机械作用去除,以获得超光滑表面。

参考文献:

- [1] ZHAI Q, ZHAI W J, DENG T H. Removal mechanism of the chemical products layer on single-crystal sapphire surface in magneto-rheological polishing with $\text{Fe}_3\text{O}_3/\text{SiO}_2$ core-shell abrasives[J]. Applied Surface Science, 2023, 619: 156778.
- [2] XU Y C, LIN C, WANG Q T, et al. A novel polishing process with rigid-flexible composite structure plate for sapphire wafer polishing[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2022, 122(2): 659-668.
- [3] 许永超.混合磨料柔性抛光工具加工蓝宝石衬底技术研究[D].泉州:华侨大学,2017.
- [4] YIN D, NIU X H, ZHANG K, et al. Preparation of MgO doped colloidal SiO_2 abrasive and their chemical mechanical polishing performance on c-, r- and a-plane sapphire substrate[J]. Ceramics International, 2018, 44(12): 14631-14637.
- [5] 赵之琳,李薇薇,钱佳,等.不同粒径纳米二氧化硅磨料对蓝宝石 CMP 去除机制的影响[J].电镀与涂饰,2021,40(9):720-725.
- [6] ZHOU M F, CHENG Y Y, ZHONG M, et al. Macro and micro-nano machining mechanism for ultrasonic vibration assisted chemical mechanical polishing of sapphire[J]. Applied Surface Science, 2023, 640: 158343.
- [7] XU W H, CHENG Y Y, ZHONG M. Effects of process parameters on chemical-mechanical interactions during sapphire polishing[J]. Microelectronic Engineering, 2019, 216: 111029.
- [8] 林佳明.基于分子动力学仿真的蓝宝石去除机理研究[D].泉州:华侨大学,2021.
- [9] OSTADHOSSEIN A, KIM S Y, CUBUK E D, et al. Atomic insight into the lithium storage and diffusion mechanism of $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ electrodes of lithium ion batteries; ReaxFF reactive force field modeling[J]. The Journal of Physical Chemistry A, 2016, 120(13): 2114-2127.
- [10] LIU Z S, ZHANG Z Y, FENG J Y, et al. A novel atomic removal model for chemical mechanical polishing using developed mesoporous shell/core abrasives based on molecular dynamics[J]. Nanoscale, 2024, 16(1): 85-96.

(责任编辑:陈雯)