

# 化学作用对 AlN 晶体研磨过程中材料去除行为的影响

黄传锦<sup>1</sup>, 顾 斌<sup>2</sup>, 周 海<sup>1</sup>, 冯 伟<sup>1</sup>

(1. 盐城工学院机械学院, 江苏 盐城 224051; 2. 常熟耐素生物材料科技有限公司, 江苏 苏州 215500)

**摘 要:** AlN 晶体是一种脆性难加工半导体材料。为了高效率高质量制备 AlN 晶体衬底, 设计了不同化学成分的研磨液研磨 AlN 晶体, 借助激光共聚焦显微镜和 X 射线光电子能谱仪研究了化学作用对晶体表面材料去除行为的影响。结果表明: 碱性研磨液有利于获得最佳研磨结果, 材料去除率为 23  $\mu\text{m}/\text{h}$ , 表面粗糙度为  $R_a$  为 122 nm。在碱性环境下研磨液中金刚石磨粒具有良好的分散性。碱性溶液能够腐蚀晶体表面, 形成含碱式铝盐的变质层, 并引起表面形貌产生显著改变。研磨界面内, 化学作用导致 AlN 晶体表面产生变质层, 便于材料的机械去除, 从而有利于提升研磨效率和研磨质量。研究结果可为 AlN 晶体超精密加工工艺优化提供参考。

**关键词:** 氮化铝晶体; 研磨; 刻蚀; 变质层

中图分类号: O786; TN305.2 文献标志码: A 文章编号: 0454-5648(2022)09-2470-07

网络出版时间: 2022-08-12



## Effect of Chemical Action on Material Removal Behavior During AlN Crystal Lapping

HUANG Chuanjin<sup>1</sup>, GU Bin<sup>2</sup>, ZHOU Hai<sup>1</sup>, FENG Wei<sup>1</sup>

(1. College of Mechanical Engineering, Yancheng Institute of Technology, Yancheng 224051, Jiangsu, China;

2. Nasurfur Biomaterial Technology Co., Ltd, Changshu, 215500, Jiangsu, China)

**Abstract:** AlN crystal is a typical brittle and difficult-to-process material. To prepare AlN crystal substrates with a high efficiency and a high quality, slurries with different chemical compositions were designed to lap AlN crystals, and the mechanism of chemical action-assisted material removal was investigated by laser confocal microscopy and X-ray photoelectron spectroscopy. The results show that the alkaline slurry is beneficial to obtaining the optimum lapping results, the material removal rate is 23  $\mu\text{m}/\text{h}$ , and the surface roughness ( $R_a$ ) is 122 nm. The diamond abrasive particles in the slurry have a good dispersibility in alkaline environment. The alkaline solution can corrode the crystal surface, form a metamorphic layer containing basic aluminum salts, and cause some changes in the surface morphology. In the lapping interface, the metamorphic layer produced by chemical etching on the surface of AlN crystal is more conducive to the mechanical removal of abrasive particles, which can lay a foundation for improving the lapping efficiency and quality. The result obtained can provide a reference for optimizing the ultra-precision processing technology of AlN crystals.

**Keywords:** aluminum nitride single crystal; lapping; etching; metamorphic layer

AlN 晶体作为第三代半导体材料, 禁带宽度约为 6.2 eV, 具有高击穿场强、高热导率、高化学和热稳定性及强抗辐射性等优良物化性能, 是制备深紫外光电器件和功率器件的最佳衬底材料, 可广泛应用于微电子和光电子领域<sup>[1-3]</sup>。AlN

晶体属于脆性难加工材料, 密度为 3.26  $\text{g}/\text{cm}^3$ , Mohs 硬度为 7~8<sup>[4-5]</sup>。目前, 由于材料生长技术的不完善, 阻碍了高质量、大尺寸 AlN 晶体原始基片的获得, 进而限制了 AlN 晶体衬底制备技术的发展<sup>[6]</sup>。

收稿日期: 2022-01-30。 修订日期: 2022-03-12。

基金项目: 国家自然科学基金(51675457); 江苏省产学研合作项目(BY2021432)。

第一作者: 黄传锦(1982—), 男, 博士, 讲师。

通信作者: 周 海(1965—), 男, 博士, 教授。

Received date: 2022-01-30. Revised date: 2022-03-12.

First author: HUANG Chuanjin (1982—), male, Ph.D., Lecturer.

E-mail: chuanjin2012@sina.com

Correspondent author: ZHOU Hai (1965—), male, Ph.D., Professor.

E-mail: zhouhai@ycit.cn

目前, 涉及 AlN 陶瓷超精密加工的研究文献较多, 但是针对 AlN 晶体加工的研究文献较少。Katahira 应用在线电解修整磨削 AlN 陶瓷, 获得了高质量加工表面<sup>[7]</sup>。Suzuki 研究了一种平面珩磨方法, 实现了对 AlN 陶瓷的高效镜面加工<sup>[8]</sup>。Sun 利用等离子辅助抛光技术加工 AlN 陶瓷, 相比传统抛光技术, 获得更好的抛光效果<sup>[9]</sup>。Zhou 应用传统研磨抛光方法加工 AlN 陶瓷, 讨论了磨料粒度对 AlN 陶瓷研抛结果的影响<sup>[10]</sup>。Asgar 应用无磨料化学机械抛光方法加工 AlN 晶体薄膜, 研究了抛光参数对加工结果的影响<sup>[11]</sup>。Chen 研究了抛光后 AlN 晶体的表面损伤情况<sup>[12]</sup>。在加工过程中, 晶体表面材料的去除可能涉及到化学作用和机械作用, 但是上述研究多倾向于材料的机械去除, 很少涉及化学作用。

本工作主要研究在研磨过程中化学作用对 AlN 晶体表面材料去除行为的影响, 首先设计并制备不同化学成分的研磨液加工晶体, 其次分析化学环境对界面内磨粒分散和接触方式的影响, 最后研究化学成分对晶体表面变质层形成的影响, 以期 AlN 晶体超精密加工工艺的优化提供参考依据。

## 1 实验

### 1.1 AlN 晶体研磨实验设计

利用金刚石线沿垂直于<0001>晶向切割 AlN 晶锭, 获得尺寸为 5 mm×5 mm×0.5 mm 的 AlN 晶体衬底样品<sup>[3]</sup>。先将切割后的 AlN 样品利用粒径 W7 的碳化硅进行粗研磨预处理, 然后应用于精研磨实

验。研磨设备为四轴研磨机, 研磨盘为锡合金盘。将 1% (质量分数) 的粒径 W3 的金刚石磨粒(河南黄河旋风股份有限公司)分散于 20% 的硅溶胶(扶桑化学青岛有限公司)中制备混合磨料研磨液, 以 H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> 和 NaOH 作为 pH 值调节剂, 并将金刚石与水混合作为参照物分析化学作用对 AlN 晶体材料去除行为的影响, 研磨液的构成见表 1, 硅溶胶参数见本课题组先前研究<sup>[13]</sup>。将上述研磨液应用于 AlN 晶体的精加工, 每种研磨液重复应用 3 遍, 工艺参数见表 2。研磨液在每次实验前使用超声分散 10 min, 并在实验过程中使用磁力搅拌分散。实验后晶体样品利用酒精超声清洗, 风干后检测。

### 1.2 化学刻蚀实验设计

化学环境不同, AlN 晶体表面发生的化学反应也不相同, 因此有必要研究研磨液中相应的化学成分对晶体表面变质层形成的影响, 从而为阐明 AlN 晶体加工过程中的化学作用辅助研磨机理奠定基础。对 AlN 晶体进行静态蚀刻实验, 将预处理后的 AlN 晶体使用酒精超声清洗, 然后分别浸泡于水和 10% 的 H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> 溶液、NaOH 溶液中, 刻蚀温度为 50 ℃, 浸泡时间为 100 min, 将刻蚀后样品用水浸泡 10 s, 取出风干后检测。

表 1 研磨实验的研磨液  
Table 1 slurries for lapping experiment

| Sample No. | Compositions                            | pH value |
|------------|-----------------------------------------|----------|
| S1         | Diamond and acidic silica sol (NY-13)   | 4.5      |
| S2         | Diamond and neutral silica sol (MT-2)   | 7.3      |
| S3         | Diamond and alkaline silica sol (NS-24) | 9.5      |
| S4         | Diamond and water                       | 7.2      |

表 2 研磨实验参数  
Table 2 Lapping Parameters

| Parameter  | Plate rotate speed/(r·min <sup>-1</sup> ) | Plate diameter/cm | Load/(g·cm <sup>-2</sup> ) | Process time/min | Slurry flow rate/(mL·h <sup>-1</sup> ) |
|------------|-------------------------------------------|-------------------|----------------------------|------------------|----------------------------------------|
| Conditions | 60                                        | 18                | 120                        | 45               | 150                                    |

### 1.3 样品表征

使用 Keyence VK-X110K 型激光共聚焦显微镜 (LSCM) 检测研磨前后 AlN 晶体表面质量, 使用质量损失法分析材料去除率<sup>[14]</sup>。使用激光显微镜观察放置于载玻片上风干后的研磨液, 获得磨粒的分布情况。利用 Thermo Scientific Escalab 250Xi 型 X 射线光电子能谱仪 (XPS) 分析晶体表面的化学构成, 测试条件: Al K<sub>α</sub> 靶 ( $h\nu=1\,486.6\text{ eV}$ ), 离子发射能 2 000 eV, 真空度  $1.0\times 10^{-8}\text{ Pa}$ 。上述采样数据使用 C 1s 284.8 eV 校正。

## 2 结果与讨论

### 2.1 材料去除率

图 1 为不同工况下 AlN 晶体的材料去除率 (MRR, 以下使用  $R_{\text{MRR}}$  表示)。由图 1 可见, 酸性研磨液(样品 S1)的  $R_{\text{MRR}}$  约为 26 μm/h, 中性(样品 S2)的  $R_{\text{MRR}}$  约为 7 μm/h, 碱性(S3)的  $R_{\text{MRR}}$  约为 23 μm/h, 水(样品 S4)的  $R_{\text{MRR}}$  约为 14 μm/h。酸性研磨液(样品 S1)和碱性研磨液(样品 S3)的  $R_{\text{MRR}}$  相对接近, 高于水(样品 S4)的, 这可能是化学作用不同导致的差异。

中性研磨液(样品 S2)的  $R_{MRR}$  约为水(样品 S4)的一半, 这可能是研磨界面内磨粒接触机制不同引起的结果。

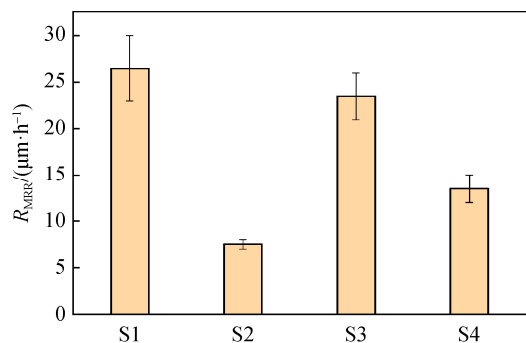


图1 不同工况下的材料去除率( $R_{MRR}$ )

Fig. 1 Material removal rate ( $R_{MRR}$ ) with different slurries during lapping

## 2.2 表面质量

图2为AlN晶体在不同条件下获得的表面粗糙度和表面形貌。由图2可见, 研磨前表面粗糙度  $R_a$  为 498 nm,  $R_z$  为 11.2  $\mu\text{m}$ 。研磨后, 酸性(样品 S1)条件下,  $R_a$  为 282 nm,  $R_z$  为 9.5  $\mu\text{m}$ ; 中性(样品 S2)

条件下,  $R_a$  为 262 nm,  $R_z$  为 11.4  $\mu\text{m}$ ; 碱性(样品 S3)条件下,  $R_a$  为 122 nm,  $R_z$  为 8.8  $\mu\text{m}$ ; 水(样品 S4)条件下,  $R_a$  为 376 nm,  $R_z$  为 13.8  $\mu\text{m}$ 。结果表明, 碱性条件下晶体表面加工质量最高; 其次为酸性; 第3为中性; 最后为水。对比酸性和中性条件下获得的晶体表面, 尽管两者的  $R_a$  相近, 但是  $R_z$  差异明显。结合图1和图2可知, 相比酸性或碱性条件, 中性条件下晶体的材料去除率最低, 研磨质量也最差。

如图2a与图2b所示, 研磨前晶体表面材料主要为脆性去除, 表面呈现为凹凸不平的脆性破碎特征。图2c~图2h为应用混合磨粒研磨液研磨晶体, 碱性条件下, 晶体表面最平坦, 凹坑数量和尺寸也达到最小, 即研磨质量最好; 图2i~图2j显示仅利用金刚石磨粒研磨晶体的结果, 虽然该晶体表面开始出现了局部平坦化趋势, 但是也造成了更大深度的凹坑, 导致晶体表面质量的恶化。对比中性和酸性条件下, 尽管表面都存在一些凹坑, 但是酸性条件下, 凹坑深度要浅一些。上述结果表明, 研磨液中化学成分有利于改善研磨液的加工性能, 提升研磨质量和研磨效率。

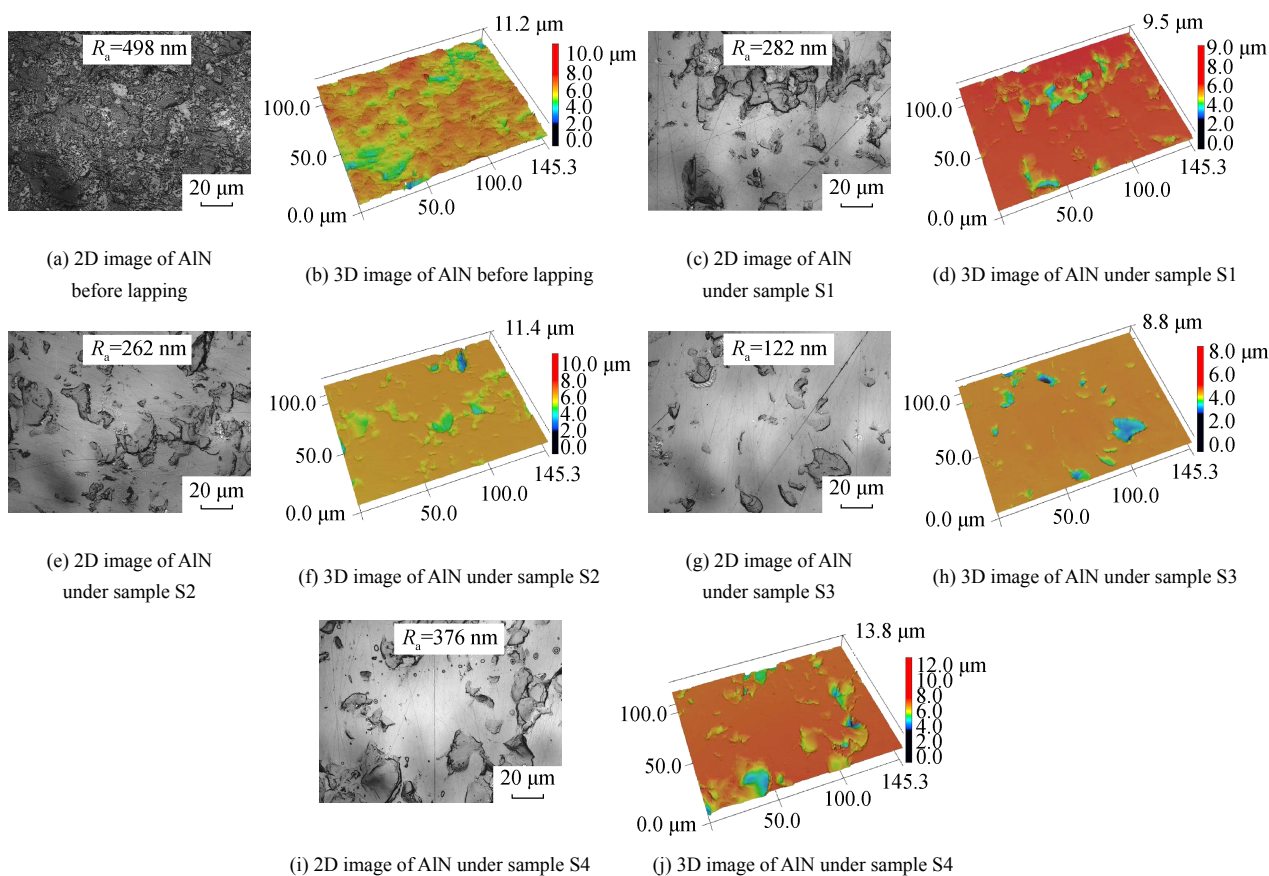
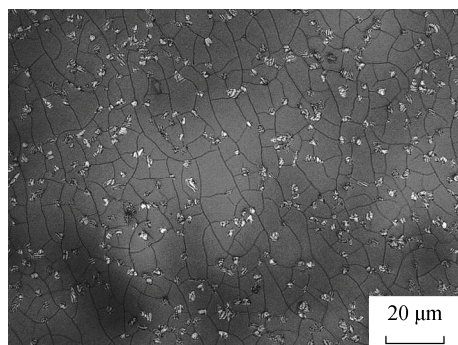
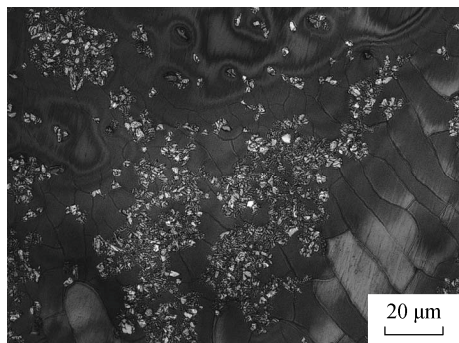


图2 不同工况下AlN的表面形貌

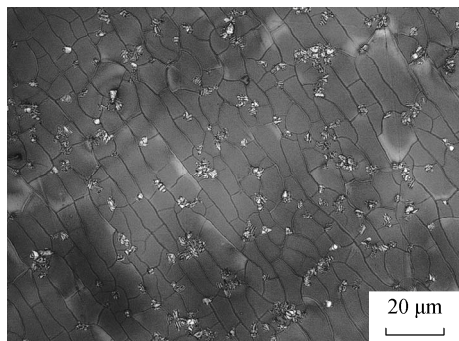
Fig. 2 LSCM images of AlN under different lapping conditions



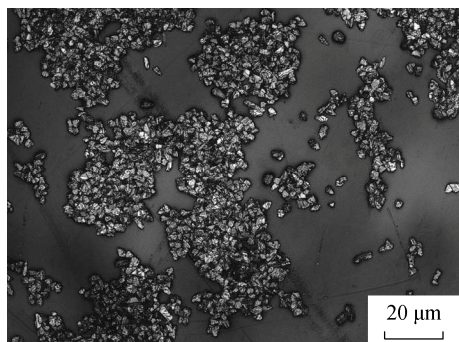
(a) Abrasive dispersion under sample S1



(b) Abrasive dispersion under sample S2



(c) Abrasive dispersion under sample S3



(d) Abrasive dispersion under sample S4

图 3 不同工况下金刚石磨粒分散情况

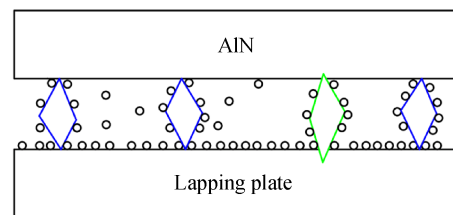
Fig. 3 LSCM images of abrasive dispersion under different conditions

### 2.3 磨粒分散与界面接触

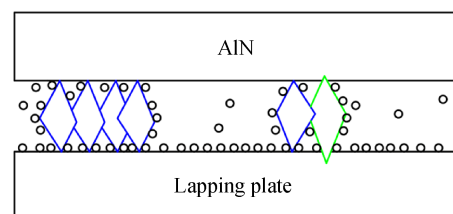
在研磨液中, 纳米二氧化硅颗粒通过静电吸附于金刚石磨粒外围, 从而有利于改善磨粒的分散性,

但是因为等电点的存在, 使得 pH 值的改变直接影响到研磨液中金刚石磨粒的实际分散结果<sup>[15]</sup>。图 3 为不同条件下的磨粒分散情况, 其中白色亮点主要为金刚石磨粒, 纹理背景为风干的硅溶胶。由图 3a~图 3c 可见, 金刚石磨粒轮廓较模糊, 这主要是因为硅溶胶中纳米颗粒吸附所导致, 金刚石磨粒在酸性和碱性硅溶胶中分散情况较好。由图 3b 和图 3d 可见, 金刚石磨粒在中性硅溶胶和水中容易团聚。

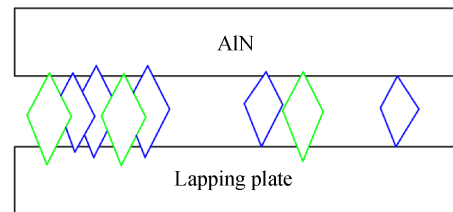
研磨液中磨粒的不同分散方式可能会引起研磨界面内接触行为的改变, 从而对晶体材料的去除机制产生影响。图 4 为研磨界面内不同条件下工件、磨粒和研磨盘的接触示意图。由图 4a 可见, 在酸性或碱性环境下, 金刚石磨粒均匀分散。而由图 4b 和图 4c 可见, 在中性和水环境下, 磨粒易团聚。质地较软的研磨盘表面微结构呈现多孔性, 这使得部分金刚石磨粒能够嵌入研磨盘表面, 形成类似半固结磨料研磨盘<sup>[16]</sup>。研磨界面内少数嵌入研磨盘的磨粒表现为两体磨损, 多数能够自由滚动的磨粒则表现为三体磨损。图 4a 中酸性或碱性硅溶胶中纳米颗



(a) Schematic of contact under sample S1 and sample S3



(b) Schematic of contact under sample S2



(c) Schematic of contact under sample S4

- ◇ Diamond with three-body abrasion
- ◇ Diamond with two-body abrasion
- Silica

图 4 研磨界面内工件-磨粒-研磨盘之间接触示意图

Fig. 4 Schematic of contact among wafer-abrasive-plate in lapping process

粒吸附在磨粒表面, 有利于促使金刚石磨粒在研磨界面内均匀分布, 并隔离磨粒与研磨盘的接触, 降低磨粒嵌入研磨盘的概率, 此时研磨界面内主要为三体磨损。反之, 图 4c 中由于缺少上述化学环境, 研磨界面内则兼具两体磨损和三体磨损。在晶体材料的精加工阶段, 相比两体磨损, 三体磨损更有利于提升研磨质量。综上, 恰当的化学环境, 有利于研磨界面内磨粒的均匀分布, 改善接触方式, 提升研磨质量。

## 2.4 AlN 晶体表面变质层的分析

图 5 为不同刻蚀条件下的 AlN 晶体表面形貌。由图 5 可见, 刻蚀后, 在水中浸泡的 AlN 晶体表面亮度最高, 其次是酸, 最后是碱。在碱中浸泡的 AlN 晶体表面形貌变化最大, 晶体表面材料结构呈现类似粉末态。这说明 AlN 晶体会与酸、碱和水发生化学反应, 引起晶体表面形貌的变化, 不过 AlN 晶体和水之间的水解反应最弱, 引起晶体表面形貌的变化也最小<sup>[5]</sup>。

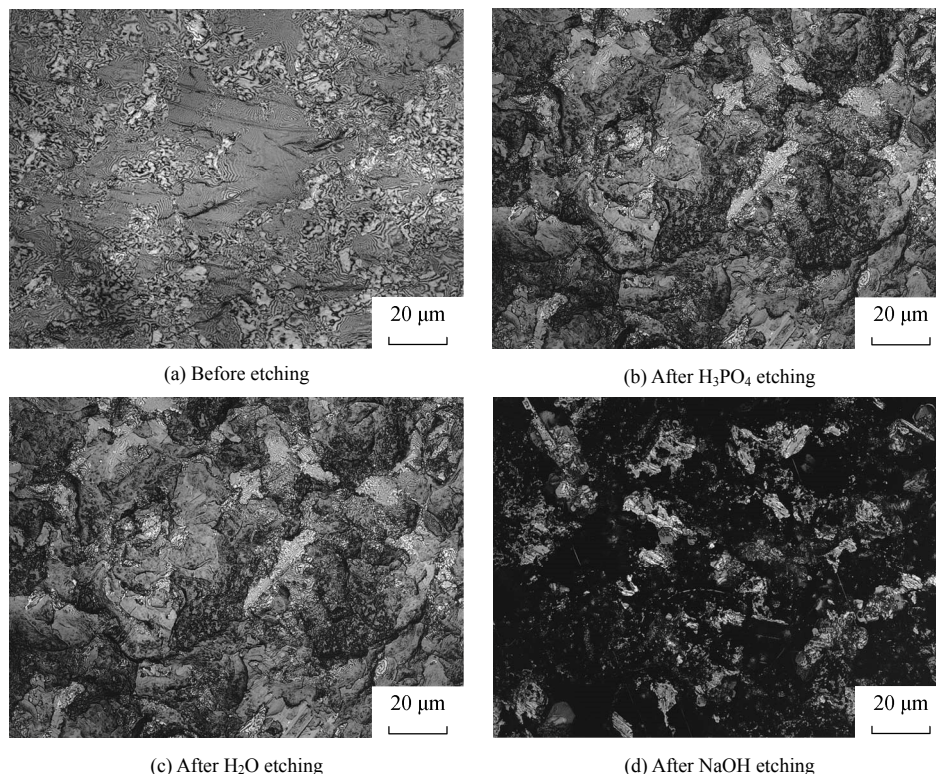


图 5 刻蚀后 AlN 晶体表面形貌  
Fig. 5 LSCM images of AlN after etching

图 6 为不同刻蚀条件下的 AlN 晶体表面的 XPS 全谱。由图 6 可见, 腐蚀前, 晶体表面除了 Al、N 元素外, 还包含 C、O 和 Fe 等杂质元素, 上述杂质元素可能是加工环境引入, 比如空气中会引入 C 和 O, 预研磨使用的铸铁盘会引入 Fe 等。经过刻蚀后, 晶体表面化学元素构成发生了改变。在酸性条件下, 晶体表面的 Fe 消失, 但是出现了 P; 碱性条件下, 晶体表面的 Fe 消失; 而在水中, 由于 AlN 晶体的水解反应较弱, 刻蚀前的 Fe 依旧存在。

图 7 为刻蚀后 AlN 晶体表面 Al 2p 的 XPS 谱。由图 7 可见, AlN 晶体表面 Al 2p 的电子结合能在各种条件下分别为: 刻蚀前为 73.7 eV; 酸中为 73.6 eV; 水中为 73.7 eV; 碱中为 73.5 eV<sup>[17–18]</sup>。粗

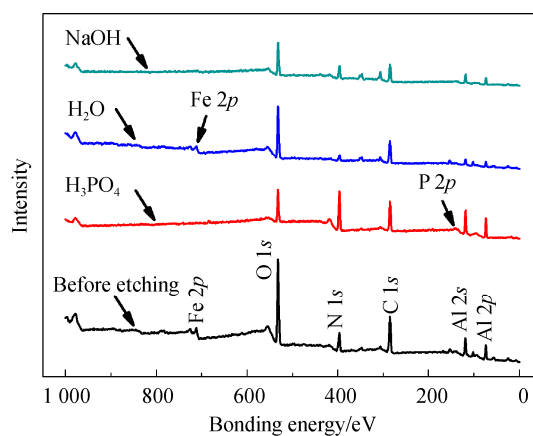


图 6 刻蚀后 AlN 晶体表面的 XPS 全谱  
Fig. 6 Wide-survey XPS spectra of AlN after etching

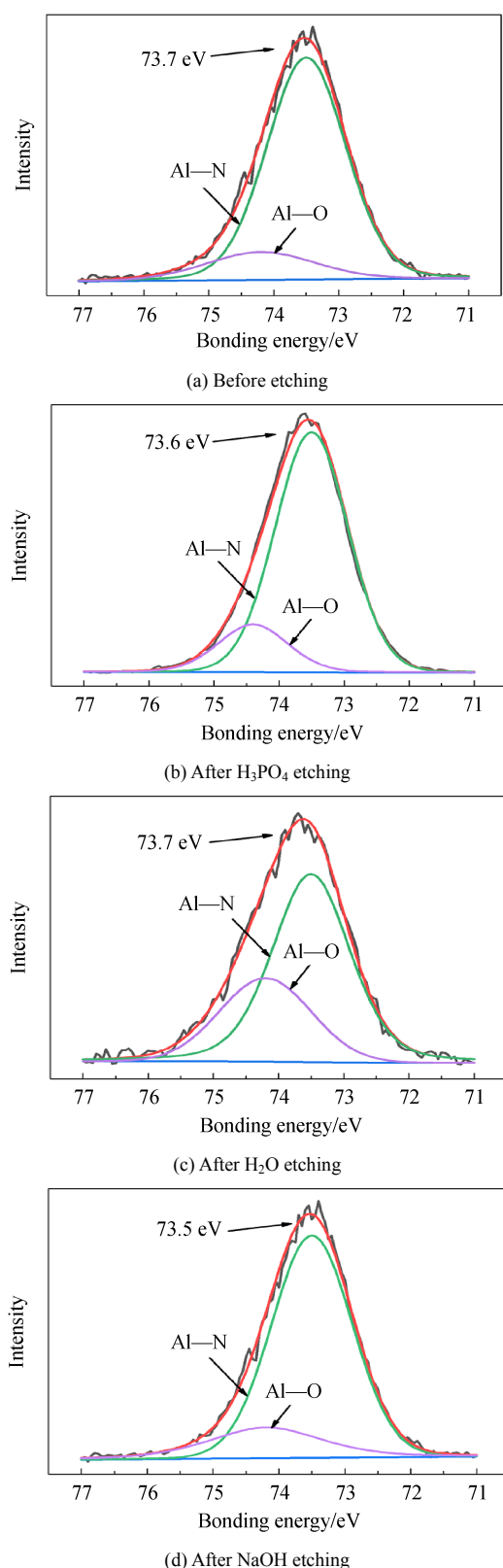


图 7 刻蚀后 AlN 晶体表面 Al 2p 的 XPS 谱

Fig. 7 High-resolution XPS Al 2p spectra of AlN after etching

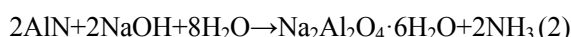
研磨预处理过程中, 晶体与水接触后发生水解反应。图 7a 中, 经过预处理后 AlN 晶体表面上 Al—N 键会转化为 Al—OH 键, 即晶体表面变质层主要为 AlN

和难溶于水的  $\text{Al}(\text{OH})_3$ , 相应的水解反应方程式(温度低于  $78^\circ\text{C}$ )为<sup>[5]</sup>:



$\text{H}_3\text{PO}_4$  能够与 AlN 反应生成磷酸铝盐, 不过该磷酸铝盐的构成较复杂, 比如不溶于水的  $\text{AlPO}_4$ , 易溶解于水的  $\text{Al}_2(\text{HPO}_4)_3$ , 可溶于水的  $\text{Al}(\text{H}_2\text{PO}_4)_3$  等<sup>[5]</sup>。由图 7b 可见, 在  $\text{H}_3\text{PO}_4$  中, AlN 晶体表面的 Al—N 键会转化为 Al—OP 键, 即晶体表面变质层主要为 AlN 和磷酸铝盐。当低于  $70^\circ\text{C}$  时, 上述磷酸铝盐容易形成稳定的保护层覆盖于晶体表面, 并抑制 AlN 晶体表面的水解反应<sup>[5]</sup>。但是上述难溶于水的磷酸铝盐变质层还可以与  $\text{H}_3\text{PO}_4$  发生进一步的化学反应, 产生易溶于水的盐, 从而引起 AlN 晶体在  $\text{H}_3\text{PO}_4$  中的持续腐蚀。图 7c 中 AlN 晶体表面变质层的构成与图 7a 类似, 主要为 AlN 和  $\text{Al}(\text{OH})_3$ ; 但是因为环境温度的提升和浸泡时间的延长, 这为 AlN 晶体的水解反应提供了更有利的条件, 相比于图 7a, 此时晶体表面水解产物  $\text{Al}(\text{OH})_3$  含量占比有所提升。

在 NaOH 溶液中, 化学反应方程式为<sup>[5]</sup>:



可见, AlN 与 NaOH 反应生成碱式铝盐, 该盐一方面可溶于水, 同时还会发生分解, 生成  $\text{Al}(\text{OH})_3$ , 吸附于晶体表面, 形成变质层。如图 7d 所示, 在碱性条件下, AlN 晶体表面的物质构成主要为 AlN 和  $\text{Al}(\text{OH})_3$ 。

AlN 晶体在酸和碱中都会生成铝盐, 其中部分铝盐会溶于水, 部分铝盐则残留于晶体表面形成变质层。在水和碱中, 尽管变质层中都含有  $\text{Al}(\text{OH})_3$ , 但是产生机制完全不同, 具体过程可见式(1)~式(3), 这将对晶体表面结构改变产生影响。综上, 研磨液中化学成分的改变会引起 AlN 晶体表面发生不同的化学反应, 并生成相应的变质层, 这明显会对 AlN 晶体的研磨结果产生影响。

## 2.5 材料去除机理

为了便于分析, 将 AlN 晶体的研磨过程分为 2 步讨论: 1) 化学腐蚀; 2) 机械去除。首先, 在研磨过程中性条件下, AlN 晶体表面会发生微弱的水解反应, 并形成变质层; 在酸性和碱性条件下, 则化学反应较明显: 一方面晶体表面生成的可溶性铝盐将随研磨液而流失; 另一方面生成的难溶性铝盐吸附于晶体表面形成变质层。相比中性环境, 酸碱环境更有利于腐蚀晶体表面材料, 生成软化

变质层, 促进材料去除。随后, 在酸性和碱性条件下, 均匀分布在研磨界面内的金刚石磨粒, 可以更高效稳定地去除晶体表面变质层, 获得理想的研磨结果; 但在中性条件下, 磨粒存在明显的团聚, 降低了研磨液的研磨性能, 不利于获得理想的研磨结果。

### 3 结论

1) 利用酸性和碱性混合磨料研磨液研磨 AlN 晶体时:  $R_{MRR}$  分别为  $26 \mu\text{m/h}$  和  $23 \mu\text{m/h}$ ; 中性的  $R_{MRR}$  为  $7 \mu\text{m/h}$ ; 研磨后, 碱性条件下获得的晶体表面  $R_a$  为  $122 \text{ nm}$ ; 酸性的  $R_a$  为  $282 \text{ nm}$ ; 中性的  $R_a$  为  $262 \text{ nm}$ 。仅利用水和金刚石磨粒混合制备的研磨液研磨后,  $R_{MRR}$  为  $14 \mu\text{m/h}$ ,  $R_a$  为  $376 \text{ nm}$ 。综合比较, 利用碱性研磨液加工 AlN 晶体可以获得最佳的研磨效率和研磨质量。

2) 相比中性环境, 在酸性和碱性环境下, 混合磨料研磨液中金刚石磨粒的分散性能更好, 这更有利于磨粒在研磨界面内均匀分布。在酸性和碱性环境下, 研磨界面内工件–磨粒–研磨盘之间更容易形成三体磨损, 有利于提升研磨质量。

3) 在酸性和碱性环境下, AlN 晶体表面分别生成酸式和碱式铝盐变质层, 有利于促进晶体表面材料的去除, 提升研磨质量和研磨效率; 但是在中性条件下, AlN 晶体表面的水解反应较弱, 形成的变质层并不能显著提升研磨效率。

#### 参考文献:

- [1] NAGASHIMA T, ISHIKAWA R, HITOMI T, et al. Homoepitaxial growth of AlN on a 2-in.-diameter AlN single crystal substrate by hydride vapor phase epitaxy[J]. J Cryst Growth, 2020, 540: 125644.
- [2] LI R, WU G, LIANG K, et al. Effects of AlN substrate orientation on crystalline quality of wurtzite GaN films investigated via molecular dynamics[J]. Comput Mater Sci, 2022, 202: 110991.
- [3] 张丽, 齐海涛, 程红娟, 等. SiC 籽晶上生长 AlN 单晶的杂质组成及处理[J]. 硅酸盐学报, 2019, 47(1): 27–32.  
ZHANG Li, QI Haitao, CHENG hongjuan, et al. J Chin Ceram Soc, 2019, 47(1): 27–32.
- [4] DYKUS J H, LEBEAU J M. A reliable approach to prepare brittle semiconducting materials for cross-sectional transmission electron microscopy[J]. J Microsc, 2017, 268: 225–229.
- [5] FUKUMOTO S, HOOKABE T, TSUBAKINO H. Hydrolysis behavior of aluminum nitride in various solutions[J]. J Mater Sci, 2000, 35(11): 2743–2748.
- [6] HU W, GUO L, GUO Y, et al. Growing AlN crystals on SiC seeds: Effects of growth temperature and seed orientation[J]. J Cryst Growth, 2020, 541: 125654.
- [7] KATAHIRA K, OHMORI H, UEHARA Y, et al. ELID grinding characteristics and surface modifying effects of aluminum nitride (AlN) ceramics[J]. Inter J Mach Tools Manuf, 2005, 45(7–8): 891–896.
- [8] SUZUKI S, YOSHIHARA N, YAN J W, et al. High-Efficiency mirror grinding of AlN by ultra-precision plane honing[J]. Key Eng Mater, 2007, 329: 291–296.
- [9] SUN R, YANG X, ARIMA K, et al. High-quality plasma-assisted polishing of aluminum nitride ceramic[J]. CIRP Ann, 2020, 69(1): 301–304.
- [10] ZHOU Z Z, YUAN J L, LV B H. Study on the finishing process for the aluminum nitride substrates[J]. Adv Mater Res, 2009, 69–70: 282–286.
- [11] ASGHAR K, DAS D. Effect of polishing parameters on abrasive free chemical mechanical planarization of semi-polar (11 $\bar{2}$ 2) aluminum nitride surface[J]. J Semicond, 2016, 37(3): 036001.
- [12] CHEN X F, SICHE D, ALBRECHT M, et al. Surface preparation of AlN substrates[J]. Cryst Res Technol, 2008, 43(6): 651–655.
- [13] HUANG C, ZHOU H, ZHU Y, et al. Effect of chemical action on the chemical mechanical polishing of  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3(100)$  substrate[J]. Prec Eng, 2019, 56: 184–190.
- [14] 黄传锦, 周海, 朱永伟, 等. 研磨液在氧化镓晶体研磨中的作用[J]. 硅酸盐学报, 2019, 47(1): 43–47.  
HUANG Chuanjin, ZHOU Hai, ZHU Yongwei, et al. J Chin Ceram Soc, 2019, 47(1): 43–47.
- [15] JINDAL A, HEGDE S, BABU S J E, et al. Chemical mechanical polishing using mixed abrasive slurries[J]. Electrochem Solid St, 2002, 5(7): G48.
- [16] KASMAN E, IRVIN M. Waste reduction in lapping sapphire and other compound semiconductor materials[C]//CS MANTECH Conference, Portland, Oregon, USA, 2010.
- [17] MOTAMEDI P, CADIEN K. XPS analysis of AlN thin films deposited by plasma enhanced atomic layer deposition[J]. Appl Surf Sci, 2014, 315: 104–109.
- [18] ROSENBERGER L, BAIRD R, MCCULLEN E, et al. XPS analysis of aluminum nitride films deposited by plasma source molecular beam epitaxy[J]. Surf Interf Anal, 2008, 40(9): 1254–1261.