

晶面及液体环境对氧化镓研磨过程 摩擦学特性的影响研究

冯伟^{1,2}, 周海¹, 黄传锦¹, 徐晓明¹, 徐彤彤¹,
夏斯伟¹, 赵雪雅¹, 卢文壮²

(1.盐城工学院 机械工程学院, 江苏 盐城 224051;
2.南京航空航天大学 江苏省精密与微细制造技术重点实验室, 南京 210016)

摘要: **目的** 探讨具有各向异性的氧化镓晶片不同晶面的研磨加工差异。**方法** 通过化学气相沉积法制备了高质量的自支撑金刚石厚膜, 采用扫描电镜及拉曼光谱对其进行表征, 将其作为摩擦副材料, 在三种不同液体环境下研磨 β -Ga₂O₃ 晶片的(100)晶面及(010)晶面, 比较摩擦学特性的差别。借助三维扫描系统、扫描电镜及 EDS 能谱, 观察与分析了加工后的氧化镓及自支撑金刚石厚膜的表面形貌、成分及磨损机理。**结果** (100)晶面及(010)晶面在去离子水环境中的摩擦系数最大, 而当液体环境为乙二醇及三乙醇胺溶液时, 研磨过程中形成了很薄的化学反应膜, 减少了犁沟效应, 摩擦系数较小。且在液体环境为三乙醇胺时, 加工后氧化镓晶片的(100)晶面及(010)晶面的粗糙度最小。研磨加工后, (010)晶面比(100)晶面的表面粗糙度 (R_a) 小。**结论** (010)晶面与(100)晶面在不同液体环境下研磨加工存在一定的差异性, (010)晶面比(100)晶面更易获得较好的表面质量。加工过程中, 磨损机理为先产生二体磨损, 一段时间后再形成三体磨粒磨损。

关键词: 氧化镓晶体; 晶面; 研磨; 自支撑金刚石厚膜; 摩擦系数

中图分类号: TH117.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2021)05-0192-06

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2021.05.021

Study on the Influence of Crystal Surface and Liquid Environment on the Tribological Properties of Gallium Oxide During Lapping

FENG Wei^{1,2}, ZHOU Hai¹, HUANG Chuan-jin¹, XU Xiao-ming¹, XU Tong-tong¹,
XIA Si-wei¹, ZHAO Xue-ya¹, LU Wen-zhuang²

(1.School of Mechanical Engineering, Yancheng Institute of Technology, Yancheng 224051, China; 2.Jiangsu Key Laboratory of Precision and Micro-manufacturing Technology, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

ABSTRACT: This work aims to investigate the difference of lapping process between different crystal surfaces of anisotropic

收稿日期: 2020-03-22; 修订日期: 2020-06-15

Received: 2020-03-22; Revised: 2020-06-15

基金项目: 国家自然科学基金 (51675457); 江苏省精密与微细制造技术重点实验室开放基金项目资助; 江苏省高校优秀科技创新团队 (2017_33)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China (51675457), Jiangsu Key Laboratory of Precision and Micro-manufacturing Technology, Technological Innovation Team of Universities in Jiangsu Province (2017_33)

作者简介: 冯伟 (1983—), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为精密与超精密加工。邮箱: zhu5411492@163.com

Biography: FENG Wei (1983—), Female, Doctor, Associate professor, Research focus: precision and ultra precision machining. E-mail: zhu5411492@163.com

引文格式: 冯伟, 周海, 黄传锦, 等. 晶面及液体环境对氧化镓研磨过程摩擦学特性的影响研究[J]. 表面技术, 2021, 50(5): 192-197.

FENG Wei, ZHOU Hai, HUANG Chuan-jin, et al. Study on the influence of crystal surface and liquid environment on the tribological properties of gallium oxide during lapping[J]. Surface technology, 2021, 50(5): 192-197.

gallium oxide wafer. High quality self-supporting diamond thick films were prepared by CVD method, which were characterized by SEM and Raman spectroscopy. They were used as tools to lap (100) and (010) crystal surfaces of β -Ga₂O₃ wafers in three different liquid environments to compare the tribological properties. The surface morphology, composition and wear mechanism of the tools were observed and analyzed by means of three-dimensional scanning system, SEM and EDS. The friction coefficients of (100) and (010) crystal surfaces are the highest in deionized water. When the liquid environment is glycol and triethanolamine solution, a very thin chemical reaction film is formed in the process, which reduces the furrow effect and the friction coefficient is small. The results show that the surface roughness of (100) and (010) crystal faces is the lowest when the liquid environment is triethanolamine. The surface roughness R_a of (010) crystal surface is smaller than that of (100) crystal surface after machining. There are some differences between (010) crystal surface and (100) crystal surface in different liquid environment, and (010) crystal surface is easier to obtain better surface quality than (100) crystal surface. In the process of machining, the wear mechanism is that two body wear occurs at first, and then three body wear occurs after a period of time.

KEY WORDS: gallium oxide crystal; crystal surface; lapping; self-supporting; diamond thick film friction coefficient

β -Ga₂O₃ 晶体材料由于具有良好的射频性能、导电性能以及高功率、低成本等特点,可作为主流电子产品的基板,在光电子器件领域、航空航天领域、军事领域都有广泛的应用前景^[1-3]。其具有大的禁带宽度,可以制作成高耐压、低损耗功率的器件,弥补了现有半导体材料的不足^[4-5]。在应用初期,氧化镓材料的形态一般是粉末状。近年来,研究人员利用提拉法、光学伏区法、薄膜生长法等制备出氧化镓晶棒^[6-9]。氧化镓晶棒的加工包括定向、切割、研磨及抛光等工艺过程,一般只有经过这些加工工艺处理后,才能用于后期的薄膜外延及器件制作^[10]。在光电子领域,对晶片的表面质量要求非常高,晶片表面质量的优劣直接影响后期外延薄膜以及器件的质量^[11]。由于氧化镓晶体属于单斜晶系,高温易分解,在加工过程中容易发生解理现象^[12-13],因此如何实现高效、高质量的加工是其得以广泛应用迫切需要解决的问题。

现如今,国内外学者针对氧化镓晶体的研究主要集中在氧化镓晶体的生长、制备加工及应用领域^[14-17]。在氧化镓晶体加工方面,为研究精加工造成的氧化镓缺陷及变形,GAO Shang 等^[18]采用纳米压痕实验及透射电镜,研究了单晶 β -Ga₂O₃ 在纳米磨削加工过程中的表面形貌变化以及变形特征。发现氧化镓晶体纳米磨削加工缺陷出现的顺序与硅、锗等材料不同,当磨削能显著提高时,在其他缺陷出现后才发现非晶态相。Wu 等^[19]研究了 β -Ga₂O₃ 晶体在纳米压痕下的形变,发现当压痕载荷增加时,会产生沿 101 晶面的位错,同时有晶格弯曲和开裂的现象产生。宋放等^[20]对氧化镓晶体两个主要晶面((100)晶面和(010)晶面)的纳米力学性能进行了研究,发现两个晶面都有“pile-up”现象,在刻划过程中期,两个晶面均出现了塑性域加工特征,(100)和(010)晶面的塑性域加工切削深度分别是 96.5~576.8 nm 和 84.6~421.6 nm。以上研究均采用纳米压痕实验法,模拟单颗金刚石颗粒在研磨及抛光过程中与工件材料之间的微观相互作用,讨论氧化镓晶体的微观变形特点,得到晶体纳米力学

特性及加工缺陷类型。在氧化镓晶片精加工工艺方面,黄传锦等^[21]采用游离磨料对氧化镓晶片进行化学机械抛光,并对其抛光机理进行了讨论,发现 H₃PO₄ 制备的浆料比 NaOH 制备的浆料更适合于 Ga₂O₃ 的化学机械抛光。该方法使抛光效率提高 20% 左右,且表面质量较高。由上述研究可知,国内外关于氧化镓晶体的研磨、抛光加工,尤其是加工工艺方面的相关研究较少。固结磨料研磨一直是业界公认的一种晶体材料高效、精密加工的方法,研究者利用该方法,针对氧化镓晶体的加工展开了深入研究,对推广氧化镓材料的应用具有重要意义。自支撑 CVD 金刚石厚膜的硬度接近天然金刚石,具有优异的力学、电学、光学等性能,本人前期的研究是将 CVD 自支撑金刚石厚膜作为工具来研磨蓝宝石晶片,获得了较高的研磨效率和优良的研磨质量^[22]。在本研究中,将自支撑金刚石厚膜作为工具对氧化镓晶片进行研磨,研究了氧化镓晶体晶面及液体环境对其研磨过程中摩擦学特性的影响,对不同晶面的氧化镓晶体的精密加工起到借鉴与指导作用,为氧化镓精密加工工艺及方法提供新的研究思路。

1 实验

采用热丝化学气相沉积(HFCVD)法制备自支撑金刚石厚膜,在实验室热丝化学气相沉积设备中进行实验,CH₄和H₂作为反应气体源,直径0.4 mm的钨丝作为热源。钨丝加热到2000~2200℃,将碳源气体CH₄分解为活性碳原子,活性碳原子在H₂的刻蚀下生成金刚石结构,冷却后,金刚石膜从基体上脱落,形成自支撑金刚石厚膜。金刚石厚膜的表面形貌及状态采用扫描电镜及拉曼光谱进行观察与分析。

为研究氧化镓晶片在研磨加工中的摩擦学特性,将沉积好的自支撑金刚石厚膜粘结在工具夹具上,与固定在试剂盘中的尺寸为10 mm×10 mm×

0.5 mm 的氧化镓晶片组成对磨副,在 UMT 摩擦磨损试验机上进行实验(如图 1 所示)。摩擦磨损实验中,压力为 1 N,线速度为 6 mm/s,对磨时间为 30 min,滑移单行程为 5 mm。所选晶片的实验晶面分别为(100)面以及(010)面,液体环境分别为去离子水、3%乙二醇、3%三乙醇胺。进行六组实验,每组实验分别进行三次,将所得摩擦系数曲线求均值进行拟合。实验后,氧化镓表面形貌及自支撑金刚石厚膜的磨损情况利用基恩士 VH-200 三维扫描系统、Nova NanoSEM 450 扫描电镜及 AZtec X-MaxN80 能谱仪进行检测。



图 1 实验仪器及安装照片
Fig.1 Laboratory equipment and installation photos

2 结果分析与讨论

2.1 金刚石厚膜材料分析

图 2 为制备的自支撑金刚石厚膜材料的表面 SEM 形貌,可见金刚石晶粒交错分布,晶粒分布较为均匀,单颗晶粒尺寸在 100 μm 左右,呈尖塔状向外凸出。图 3 为金刚石厚膜材料的表面拉曼光谱,在 1332 cm^{-1} 左右,出现了强度峰值,此为典型的金刚石峰的特性^[23]。由此可见,按照上述参数制备的为金刚石材料且品质优良,可将其作为研磨氧化镓晶体材料的工具。

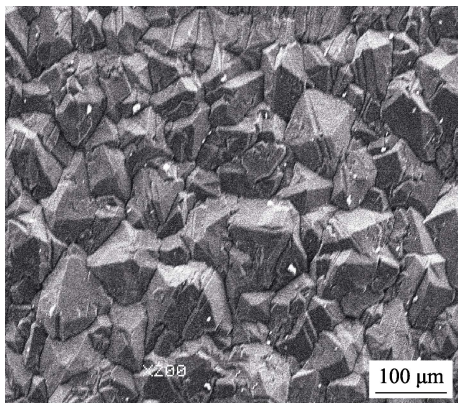


图 2 金刚石厚膜表面形貌 SEM 照片
Fig.2 SEM image of diamond thick film surface morphology

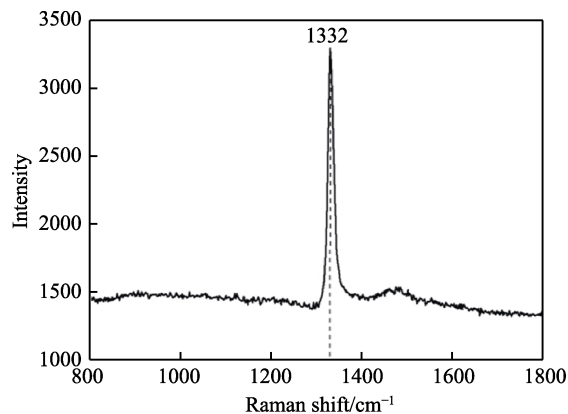


图 3 金刚石厚膜拉曼光谱图
Fig.3 Raman spectra of diamond thick film

2.2 摩擦学特性分析

图 4 为不同液体环境下自支撑金刚石厚膜与氧化镓晶片对磨时的摩擦系数曲线。可见六条曲线均呈现先增大后减小,之后逐渐趋于平稳的趋势。考虑到摩擦学实验开始阶段运行不完全平稳,这个增大的过程即为切入“run-in”阶段。

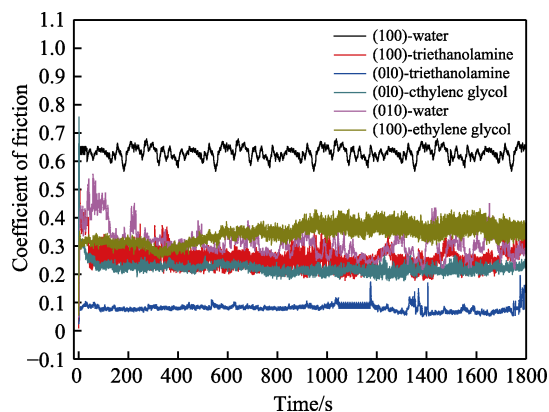
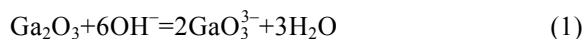


图 4 实验摩擦系数曲线
Fig.4 Experimental friction coefficient curve

自支撑金刚石厚膜在水环境、3%乙二醇、3%三乙醇胺中研磨(100)晶向的氧化镓晶片时,平稳后的摩擦系数均值分别约为 0.65、0.35、0.22。金刚石厚膜在水环境、3%乙二醇、3%三乙醇胺中研磨(010)晶向的晶片时,平稳后的摩擦系数分别约为 0.28、0.2、0.09。由此可见,氧化镓晶体的两个晶面与自支撑金刚石厚膜对磨时,在水环境中的摩擦系数最大,乙二醇次之,三乙醇胺最小。这主要是因为去离子水环境中,水本身没有氧化性,在氧化镓表面不能形成氧化膜,只是在氧化镓表面形成一层水膜,不能改变氧化镓原子之间的键能,相互作用仍然是纯粹的机械作用,因此摩擦系数较大^[24]。当液体环境为乙二醇溶液和三乙醇胺溶液时,由于氧化镓(Ga_2O_3)为弱酸性的两性氧化物,容易与化学溶液中的 OH^- 发生摩擦化学反应,生成剪切强度更低的可溶性 GaO_3^{3-} (反应机理如式(1)所示^[21]),会在氧化镓晶片与自支撑金刚

石厚膜之间形成一层很薄的化学反应膜, 由于其剪切强度低而形成易滑动的界面, 在摩擦过程中, 该薄膜缓慢地磨去又生成新的薄膜, 减少了犁沟效应。因此, 在相同基体、相同实验参数下, 添加三乙醇胺溶液和乙二醇溶液时, 氧化镓晶片与自支撑金刚石厚膜对磨的摩擦系数比在去离子水环境下对磨的摩擦系数小。



由摩擦系数差异可知, 不同的研磨液种类对氧化镓晶体的(100)晶面的摩擦学特性影响较大。总体来看, (100)晶面与自支撑金刚石厚膜对磨时的总体摩擦系数高于(010)晶面与金刚石厚膜对磨的摩擦系数。另外, 在相同液体环境下, 不同晶向的氧化镓晶片与金刚石厚膜对磨时的摩擦系数也存在差异。对比前一段中的摩擦系数值可见, 在宏观摩擦学实验中, (100)晶面的摩擦系数均大于(010)晶面的摩擦系数。这主要是由于(010)晶面之间的化学键呈三维网状结构, 晶面之间容易产生抵抗不同方向的外力, 而(100)晶面间结合力较弱, 具有二维材料的性质, (100)晶面材料更易去除^[25], 在研磨过程中, 较多去除的材料碎屑游离于对磨面之间, 研磨时会承受更大的阻力。而本实验选

取的研磨压力相同, 因此在相同液体环境下, 不考虑化学因素的影响, (100)晶面的摩擦系数大于(010)晶面的摩擦系数。

2.3 氧化镓表面形貌及自支撑金刚石厚膜的磨损特性

实验后, 对氧化镓表面形貌及自支撑金刚石厚膜的磨损情况进行观察与分析。图 5 为不同液体环境下氧化镓(010)及(100)晶面的三维表面形貌。(010)晶面在去离子水、3%乙二醇、3%三乙醇胺中的粗糙度(R_a)均值分别为 1.372、1.897、0.136 μm , 而(100)晶面对应的 R_a 分别为 1.728、0.085、0.414 μm 。可见在相同压力及研磨速度下, 在去离子水环境中, (100)晶面的表面粗糙度均值最大。这与上述在水润滑条件下, 自支撑金刚石厚膜片与氧化镓晶体对磨的摩擦系数最大所反映的现象相一致。在相同的正压力下, 其摩擦力最大, 产生大量的热量, 导致晶片与水膜之间的液体变少, 不能起到很好的润滑和散热作用, 容易产生局部温度梯度, 导致研磨不均匀, 容易产生研磨缺陷^[26]。

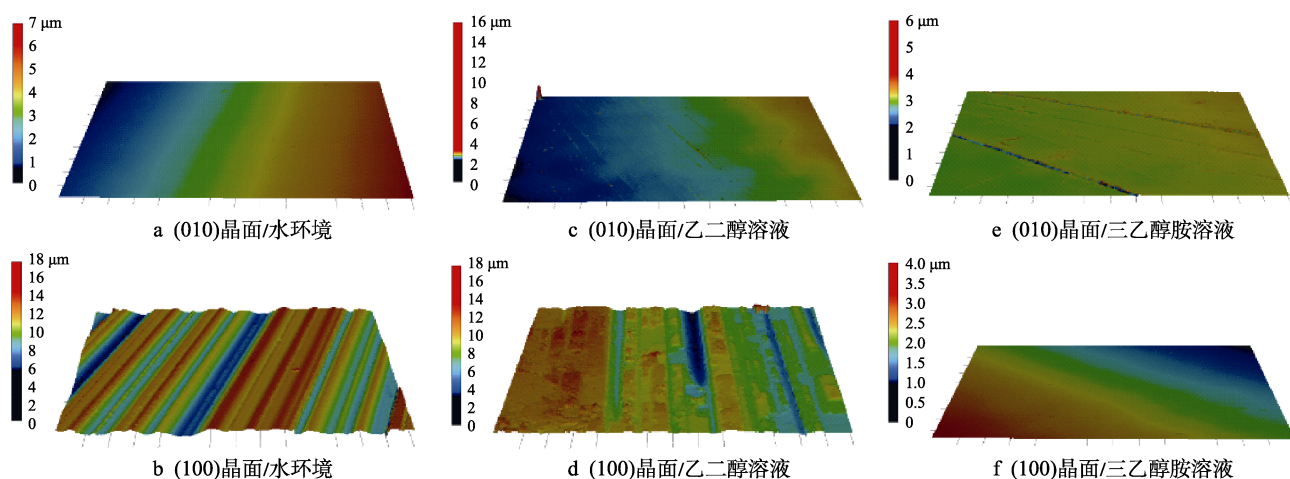


图 5 研磨后氧化镓晶片表面三维形貌图

Fig.5 Three-dimensional surface topography of gallium oxide wafer after lapping: a) (010) crystal face in water Environment; b) (100) crystal face in water Environment; c) (010) crystal face in ethylene glycol solution; d) (100) crystal face in ethylene glycol solution; e) (010) crystal face in triethanolamine solution; f) (100) crystal face in triethanolamine solution

在液体环境为三乙醇胺溶液时, (010)晶面与自支撑金刚石厚膜对磨后, 表面粗糙度值最小, 获得了较好的表面质量。比较各粗糙度值, 发现在相同工艺参数下, (010)晶面比(100)晶面更容易获得较好的表面质量。如对相同的晶面进行加工, 液体环境为三乙醇胺溶液时, 获得的表面粗糙度值最小。考虑到一般氧化镓晶体在加工中的(010)面以脆性断裂为主, 并伴有少量破碎区, 而(100)面以解理分层为主, 可能还会产生块状解理。图 6 为实验后氧化镓晶片的表面形貌, 图 6a 为(100)晶面, 可见有沿着对磨方向的划痕, 小部分区域可见解理纹。图 6b 为相同放大倍数下

(010)晶面的表面形貌, 可见表面较为光滑, 未见明显解理纹路。因此, 氧化镓晶体的(010)晶面比(100)面更适合采用自支撑金刚石厚膜工具进行加工, 固体磨料加工中, 选择三乙醇胺溶液作为研磨液更有利于晶体表面质量的提高。

自支撑金刚石厚膜在与氧化镓晶片接触的初始阶段, 自支撑金刚石厚膜与氧化镓表面发生相对运动, 两个表面的粗糙峰会直接啮合, 表层将发生机械性质的变化, 两接触面会产生擦伤或微小的犁沟痕迹, 发生二体磨损。对磨一段时间之后, 表面的金刚石材料经反复的弹性变形, 产生疲劳破坏。图 7 为实

验后自支撑金刚石厚膜的表面形貌,部分金刚石表面晶粒由原来的尖塔状转变为顶端近近平面状。另外,由实验后氧化镓表面电子图像及EDS能谱(图8)可知,氧化镓表面有颗粒状物质嵌入,发现除氧化镓等基体元素外,绝大部分为金刚石C,可以推断有少量的金刚石破损微粒混入到研磨液中,微粒移动于两摩擦表面,产生三体磨粒磨损。因此,在自支撑金刚石厚膜工具研磨氧化镓晶片时,先产生二体磨损,一段时间后会产生三体磨粒磨损。

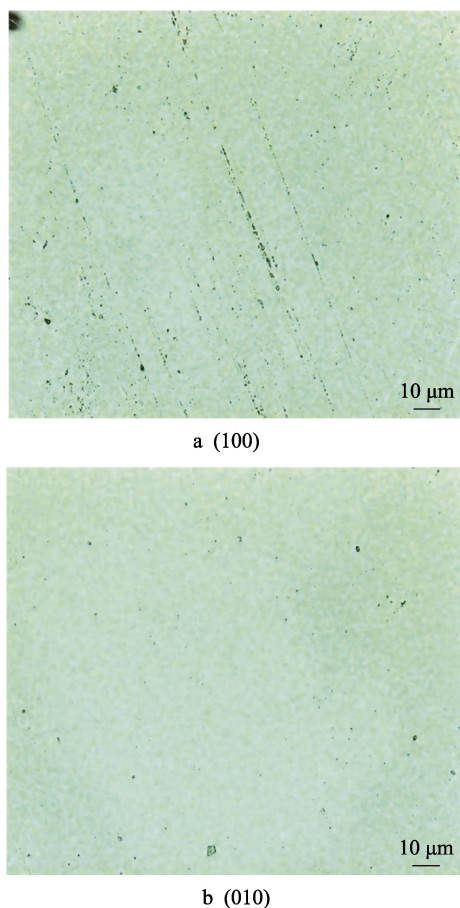


图6 研磨后的氧化镓晶片表面形貌图

Fig.6 Surface topography of gallium oxide wafer after lapping

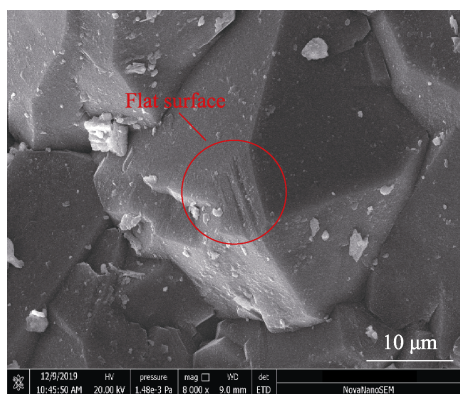


图7 实验后金刚石厚膜表面 SEM 照片

Fig.7 SEM photo of diamond thick film surface after experiment

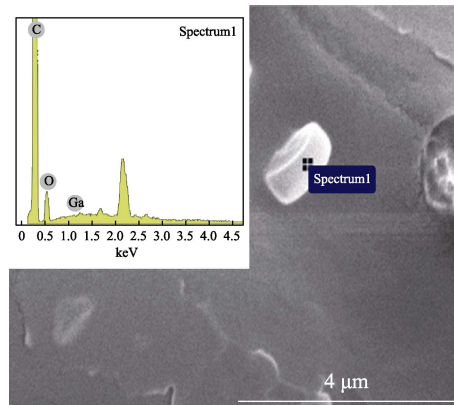


图8 实验后氧化镓表面照片及EDS谱图

Fig.8 Surface photo of gallium oxide and EDS after experiment

3 结论

1) 在不同液体环境下,氧化镓晶体的两个晶面与自支撑金刚石厚膜工具对磨时,在去离子水环境中的摩擦系数最大,乙二醇次之,三乙醇胺最小。氧化镓晶体的(100)晶面在研磨过程中,受研磨液种类的影响,所产生的摩擦学特性差异较大。(100)晶面与自支撑金刚石厚膜对磨时的摩擦系数,高于(010)晶面与金刚石厚膜对磨时的摩擦系数。

2) 相同压力及研磨速度下,在液体环境为去离子水时,(100)晶面的表面粗糙度均值 Ra 为 $1.897 \mu\text{m}$,为六组实验的最大值。液体环境为三乙醇胺时,(010)晶面的表面粗糙度均值 Ra 为 $0.414 \mu\text{m}$,为六组实验的最小值。相同工艺参数下,(010)晶面比(100)晶面更易获得较好的表面质量。氧化镓晶体的(010)晶面比(100)晶面更适于采用自支撑金刚石厚膜工具进行加工,加工中选择三乙醇胺作为研磨液,更有利于晶体表面质量的提高。

3) 自支撑金刚石厚膜工具加工氧化镓晶片时,两表面的粗糙峰会直接啮合,产生二体磨损,一段时间之后,表层的金刚石晶粒产生疲劳损坏,破损微粒混入到研磨液中,产生了三体磨粒磨损。

参考文献:

- [1] SANTIA M D, TANDON N, ALBRECHT J D. Effects of strain on the optical and thermodynamic properties of $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ [J]. Solid state communications, 2019, 297: 1-5.
- [2] ORLANDI F, MEZZADRI F, CALESTANI G et al. Thermal expansion coefficients of $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ single crystals[J]. Applied physics express, 2015, 8(11): 101-111.
- [3] 庄睿. 氧化镓生长取向和形貌的控制研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2014.

ZHUANG Rui. The study of gallium oxide film's growth orientation and morphology[D]. Dalian: Dalian University

- of Technology, 2014.
- [4] 陶绪堂, 穆文祥, 贾志泰. 宽禁带半导体氧化镓晶体和器件研究进展[J]. 中国材料进展, 2020(2): 113-123.
TAO Xu-tang, MU Wen-xiang, JIA Zhi-tai. Research progress in the crystal growth and devices of wide-bandgap β -Ga₂O₃[J]. Materials China, 2020(2): 113-123.
- [5] 唐慧丽, 何诺天, 罗平, 等. 超宽禁带半导体 β -Ga₂O₃ 单晶生长突破 2 英寸[J]. 人工晶体学报, 2017, 46(12): 232-233.
TANG Hui-li, HE Nuo-tian, LUO Ping, et al. Ultra-wide bandgap semiconductor β -Ga₂O₃ single crystal growth breaks through 2 inches[J]. Journal of synthetic crystals, 2017, 46(12): 232-233.
- [6] GELLER S. Crystal structure of β -Ga₂O₃[J]. Journal of chemical physics, 1960, 33(3): 111-122.
- [7] NIKOLAEV V I, PECHNIKOV A I, STEPANOV S I, et al. HVPE growth of GaN layers on cleaved β -Ga₂O₃ substrates[J]. Key engineering materials, 2016, 674: 302-307.
- [8] GALAZKA Z, UECKER R, IRMSCHER M, et al. Growth and characterization of β -Ga₂O₃ single crystals[J]. Crystal research & technology, 2010, 45(12): 1229-1236.
- [9] NIKOLAEV V I, MASLOV V L. Growth and characterization of β -Ga₂O₃ crystals[J]. Journal of crystal growth, 2017, 457: 132-136.
- [10] MASTRO M A, KURAMATA A, CALKINS J, et al. Perspective-opportunities and future directions for Ga₂O₃[J]. ECS journal of solid state science and technology, 2017, 6(5): 356-359.
- [11] 吴庆辉, 唐慧丽, 苏良碧, 等. 光学浮区法生长掺铟氧化镓单晶及其性能[J]. 硅酸盐学报, 2017, 45(4): 548-552.
WU Qing-hui, TANG Hui-li, SU Liang-bi, et al. Growth and properties of β -Ga₂O₃:In single crystal by optical floating zone method[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2017, 45(4): 548-552.
- [12] YANG J C, REN F, TADJER M, et al. Ga₂O₃ scottty rectifiers with 1 ampere forward current, 650 V reverse breakdown and 26.5 MW·cm⁻² figure of merit[J]. Aip advances, 2018, 8(5): 055026.
- [13] ZBIGNIEW G, KHAUS I, REINHARD U, et al. On the bulk β -Ga₂O₃ single crystals grown by the czochralski method[J]. Journal of crystal growth, 2014, 404(6): 184-191.
- [14] LI M, YU Z, HOU Y, et al. Charge trapping and transfer mechanisms of noble metals and metal oxides deposited Ga₂O₃ toward typical contaminant degradation[J]. Chemical engineering journal, 2019, 370: 1119-1127.
- [15] SUN D, GAO Y, XUE J, et al. Defect stability and electronic structure of doped β -Ga₂O₃: A comprehensive ab initio study[J]. Journal of alloys and compounds, 2019, 794: 374-384.
- [16] OSAMU U, NORIAKI I, KIMIYOSHI K, et al. Structural evaluation of defects in beta-Ga₂O₃ single crystals grown by edge-defined film-fed growth process[J]. Japanese journal of applied physics, 2016, 55(12): 211-219.
- [17] KUMAR V. The effect of deposition time on the structural and optical properties of β -Ga₂O₃ nanowires grown using CVD technique[J]. Journal of nanoparticle research, 2014, 16(1): 2189.
- [18] GAO S, WU Y, KANG R, et al. Nano grinding induced surface and deformation mechanism of single crystal β -Ga₂O₃[J]. Materials science in semiconductor processing, 2018, 79: 165-170.
- [19] WU Y Q, GAO S, HUANG H. The deformation pattern of single crystal β -Ga₂O₃ under nanoindentation[J]. Materials science in semiconductor processing, 2017, 71: 321-325.
- [20] 宋放. 化镓纳米力学性能及固结磨料研磨实验研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2019.
SONG Fang. Research on the nanomechanical properties and fixed abrasive lapping experiment of β -Ga₂O₃ [D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2019.
- [21] HUANG C J, ZHOU H, ZHU Y W, et al. Effect of chemical action on the chemical mechanical polishing of β -Ga₂O₃(100) substrate[J]. Precision engineering, 2019, 56: 184-190.
- [22] 冯伟. 金刚石工具高效加工蓝宝石球罩基础研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2017.
FENG Wei. Fundamental research on high efficiency machining of sapphire dome with diamond tools[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2017.
- [23] DEUERLER F, POHL M, HEBING C. Micro- and nano-structured diamond films under wear charging in cavitation test[J]. Surface and coatings technology, 2003, 174: 732-737.
- [24] 赵俊马. 不同晶面砷化镓衬底化学机械抛光研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2018.
ZHAO Jun-ma. Investigation on chemical mechanical polishing performance of gallium arsenide substrate on different crystal planes [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2018.
- [25] 穆文祥. β -Ga₂O₃ 单晶的生长、加工及性能研究[D]. 济南: 山东大学, 2018.
MU W X. Study on the single crystal growth, process and properties of β -Ga₂O₃[D]. Jinan: Shandong University, 2018.
- [26] 张楷亮, 刘玉岭, 王芳. ULSI 硅衬底的机械化学抛光[J]. 半导体学报, 2004, 25(1): 115-119.
ZHANG K L, LIU Y L, WANG F. Chemic-mechanical polishing of silicon wafer in ULSI[J]. Chinese journal of semiconductors, 2004, 25(1): 115-119.