

DOI: 10.13957/j.cnki.tcx.2023.02.002

氮化铝陶瓷的超精密加工研究现状与发展趋势

潘 飞, 王建彬, 徐慧敏, 姚金结, 王巧玉

(安徽工程大学 机械工程学院, 安徽 芜湖 241000)

摘 要: 用于新型半导体材料的氮化铝陶瓷, 具有热导率高、与硅相匹配的热膨胀系数、介电性能优异(低介电常数, 低介质损耗)、机械性能好、无毒性、光传输速度快等特性, 是目前制备高性能陶瓷基板和封装的理想材料。综述了氮化铝的基本结构和性能特点, 阐述了目前氮化铝陶瓷材料应用领域以及应用前景, 详细叙述了国内外超精密加工的研究现状, 总结了化学机械抛光、磁流变抛光、ELID 磨削、等离子辅助抛光等纳米级别的光滑表面加工方法, 并对氮化铝陶瓷精密加工的未来发展方向提出了展望。

关键词: 氮化铝陶瓷; 晶体结构; 超精密加工

中图分类号: TQ174.75

文献标志码: A

文章编号: 1000-2278(2023)02-0208-09

Research Status and Development Trend of Ultra Precision Machining of Aluminum Nitride Ceramics

PAN Fei, WANG Jianbin, XU Huimin, YAO Jinjie, WANG Qiaoyu

(School of Mechanical Engineering, Anhui Polytechnic University, Wuhu 241000, Anhui, China)

Abstract: As a new semiconductor material, aluminum nitride ceramics have the characteristics of ultra wide band gap, high thermal conductivity, thermal expansion coefficient matching with silicon, excellent electrical properties (low dielectric constant, good dielectric loss), good mechanical properties, non toxicity, fast optical transmission speed, etc. They are ideal materials for preparing high-performance ceramic substrates and packaging. The basic structure and performance characteristics of aluminum nitride are summarized. The current application fields and application prospects of aluminum nitride ceramic materials are described. The current research status of ultra precision machining at home and abroad is described in detail. Several common surface processing methods, such as chemical mechanical polishing, magnetorheological polishing, ELID grinding and plasma assisted polishing, are summarized. Nano level smooth surfaces are obtained. The future development direction of aluminum nitride ceramic precision machining is prospected.

Key words: aluminum nitride; ceramic crystal structure; ultra precision machining

0 引 言

随着大功率第三代半导体芯片的发展, 封装材料迎来新挑战^[1-2]。现有的陶瓷基板和其他材料已无法满足半导体器件的新需求^[3-4]。氮化铝 (AlN) 是一种新型的半导体材料, 具有热导率高、禁带宽度大、化学性能稳定、无毒性以及与硅相

匹配的热膨胀系数等性能^[5-6], 能够满足半导体器件的新需求, 被广泛应用于各领域。在电子封装领域, 氮化铝陶瓷与其他封装材料相比, 具有更高击穿电场、更短吸收截止边和更好散热性等, 因而成为新一代理想的封装材料^[7-10]; 在功率模块领域, 氮化铝陶瓷由于具有热导率高、绝缘性好、抗电强度高、介电损耗低等特性, 已被广泛应用

收稿日期: 2022-06-30。

修订日期: 2022-11-09。

基金项目: 安徽省高校优秀青年人才支持计划重点项目(gxyqZ-D2019051), 2018 年安徽工程大学中青年拔尖人才培养计划和芜湖市科技计划资助项目(2020yf20)。

通信联系人: 王建彬(1982-), 男, 博士, 教授。

Received date: 2022-06-30.

Revised date: 2022-11-09.

Correspondent author: Wang Jianbin (1982-), Male, Ph.D., Professor.

E-mail: wjb@ahpu.edu.cn

于集成电路芯片载体、光电子集成电路功能模块、IGBT 模块等诸多场景^[11-12]; 在射频/微波通信领域, 氮化铝陶瓷由于具有电阻率高、直接带隙等特性, 以其为材料制备的器件已用于在通信基站、微波衰减、高功率无线通信等领域^[13-15]; AlN 薄膜材料在高温下具有良好的热稳定性和压电性能, 能在高温恶劣环境下工作, 在 MEMS、传感器、微模块等领域已有应用^[16]。

氮化铝陶瓷材料的表面质量和加工精度对器件的性能和使用寿命具有重要影响, 例如: 在电子封装中, 氮化铝陶瓷基片的轻量化和超光滑表面能够减小体积, 还能降低内阻, 有利于芯片的散热; 在氮化铝陶瓷基片的应用中要求表面超光滑, 表面粗糙度 $R_a \leq 8 \text{ nm}$, 损伤深度达到纳米级别; 在集成电路芯片应用中, 氮化铝陶瓷基片经过抛光后的表面精度需要满足 $\text{RMS} < 2 \text{ nm}$ ^[17]。氮化铝陶瓷的高硬度、高脆性和低断裂韧性, 使之在加工过程中容易产生表面缺陷和亚表面损伤。如何获得高质量的平坦化加工表面, 提高加工效率, 减少加工中出现的缺陷和损伤, 一直都是超精密加工领域的研究热点。

目前, 氮化铝陶瓷基片的加工方法主要以抛光磨削为主, 以其他超精密加工方法为辅, 来确保成品基片的高度完整性。本文概述了氮化铝的晶体结构、性能特点、应用介绍以及加工现状和材料去除机理、损伤机理等方面的国内外研究现状, 并对氮化铝的超精密加工方法的未来发展方向提出展望。

1 氮化铝的结构与主要性能

1.1 氮化铝的结构

氮化铝(AlN)属于 III-V 族中的强共价化合物, 是一种以共价键相连的人工合成二元材料, 在自然界中并不存在。氮化铝是与硫化锌、纤维锌矿同型的六方晶系, 它以铝原子为中心原子与相邻的四个氮原子形成 $[\text{AlN}_4]$ 四面体作为基本结构单元, 类似于金刚石的结构, 按照氮铝原子在晶体中堆垛顺序的不同可以分为六方纤锌矿(α 相)和立方闪锌矿(β 相)结构。其中, 六方纤锌矿结构是 AlN 晶体的稳定结构, 而立方闪锌矿结构是亚稳态结构。本文主要讨论的是氮化铝的稳定结构, 其晶体结构如图 1 所示。图 1(a)中蓝色为铝原子, 黄色为氮原子, 沿 c 轴方向的 Al-N 键长为 0.1917 nm , 其他方向的 Al-N 键长为 0.1885 nm 。AlN 的空间群为 $P6_3mc$; 图 1(b)图中晶格常数 a 为 0.3110 nm 、 c 为 0.4981 nm ,

键角分别为 90° 和 120° ^[18]。

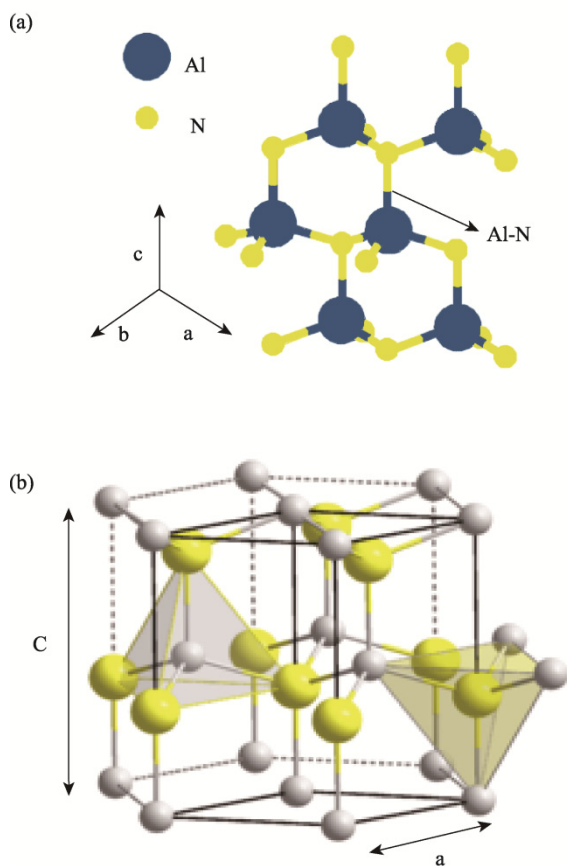


图 1 氮化铝晶体结构

Fig. 1 Crystal structure of aluminum nitride

1.2 氮化铝的性能

氮化铝陶瓷是近年来电子产业, 尤其是封装和电路基板中一类常用的材料, 具有优异的热学性能、化学性能、机械性能等, 并且有取代毒性氧化铍陶瓷和热氧化铝陶瓷的强劲趋势。氮化铝各方面性能的具体参数和说明如下。

热学性能: AlN 的理论热导率为 $320 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ^[19], 仅比铜的热导率($390 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)略低。实际上, 人工制备的多晶 AlN 的热导率一般为 $(10 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \sim 260 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$, 室温热导率为氧化铝的 $10 \sim 15$ 倍, 接近于 BeO($350 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)。目前, 热压烧结的氮化铝陶瓷的热导率最高。当温度高于 200°C 时, 导热性能又优于氧化铍; 在 $25^\circ \text{C} \sim 400^\circ \text{C}$ 的范围内, 纯 AlN 的热膨胀系数为 $4.4 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, 与硅的热膨胀系数 $3.4 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ 相近。优异的热学性能让氮化铝从众多超宽禁带材料中脱颖而出成为最理想射频器件。

机械性能: 材料在实际应用中必然要考虑机械

性能,氮化铝陶瓷的性能与制备工艺有关,氮化铝陶瓷在室温下的主要性能如表 1 所示。氮化铝的维氏硬度为 12 GPa,机械弯曲强度约为 350 MPa~400 MPa,弹性模量为 310 GPa,具有优异的综合性能。

化学性能:氮化铝陶瓷具有良好的高温抗腐蚀能力,不被铝、铜、银、铅、铌等多种金属浸润,也能在某些融盐中稳定存在(如砷化镓的融盐);AlN 具有强烈的吸湿性,极易与空气中的水蒸气反应;在空气中,氮化铝陶瓷的初始氧化温度为 700 °C~800 °C;常压下,AlN 不会融化,而是在 2260 °C~2500 °C 时发生热分解。在碱性环境下易于生成软质层产生溶解现象,便于后续的超高精密加工的材料去除。

其他性能:氮化铝陶瓷相比于氮化镓(GaN)、金刚石、氧化铝(Al_2O_3)等封装材料相比,还具有低介电常数、低介电损耗、高击穿场强等性能。

表 1 常温下氮化铝基片的机械性质参数

Tab. 1 Mechanical property parameters of aluminum nitride substrate at room temperature

Nature	Numerical value	Unit
Density	3.26	$\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$
Microhardness	12	GPa
Elastic constant ^[20]	C_{11} 410±10	
	C_{33} 389±10	
	C_{44} 125±5	
Bulk modulus ^[21]	B_s 210	GPa
Young's modulus ^[22]	Y_o 308	GPa
Modulus of elasticity ^[22]	Portrait C_L 334	GPa
	Tangential C_S 131	
Shear modulus	8.25×10^{11}	$\text{dyn}\cdot\text{cm}^{-2}$
Poisson with different crystal orientations ^[23]	{0001} 0.287	
	{1120} 0.216	

2 国内外加工现状及分析

氮化铝粉体后期经过成型工艺和烧结工艺制成氮化铝陶瓷,氮化铝粉末主要靠人工合成。当前氮化铝粉末的制备方法有碳热还原法^[24]、自蔓延法^[25]、直接氮化法^[26]、机械化学法^[27]、化学气相沉积法^[28]等。

氮化铝陶瓷硬度高、难加工。在氮化铝陶瓷的各应用领域中,都对其表面加工质量和精度提出了较高要求,脆硬材料在加工过程中容易产生脆性断裂引起加工表面产生破碎层、脆性裂纹、残余应力、塑性变形区等一系列表面缺陷。陶瓷基板在 LED 器件中主要面对热力学环境的工作条件,因而上缺陷会极大地影响基板的性能,降低器件的使用稳定性和寿命。因此,实现氮化铝陶瓷基板表面的近无损伤加工是十分必要的。目前,为了获得表面质量较高的氮化铝陶瓷基板,主要采用化学机械抛

光、磁流变抛光、ELID 磨削、激光加工、等离子辅助抛光以及复合抛光等超精密加工方法。

2.1 氮化铝陶瓷化学机械抛光工艺

化学机械抛光(Chemical Mechanical Polishing, CMP)^[29]作为目前半导体行业使用最广泛的全局平坦化技术,工作原理图如图 2 所示。工艺装置主要由旋转抛光盘、试件装夹器及抛光液输送装置三部分构成。抛光盘上粘贴有抛光垫并自旋转,外部通过承载器给晶片施加正压力,使得晶片与抛光垫两者之间有合适的正压力,能够产生相对运动。根据磨料的状态一般分为游离磨料抛光和固结磨料抛光。氮化铝陶瓷的 CMP 研究已经取得了一系列的进展。Takahashi 等^[30]使用 Al_2O_3 和 Cr_2O_3 作为磨料对 AlN 多晶进行了湿式抛光,加工后的 AlN 材料的表面粗糙度 R_a 为 100 nm,抛光速率为 $10 \mu\text{m}\cdot\text{ks}^{-1}$,通过观察抛光后的工件表面形貌,发现存在严重的表层损伤,损伤层厚度为 0.5 μm 。Filatov 等^[31]使用金刚石作为磨料进行了氮化铝陶瓷的湿式机械抛光,研究了运动学参数对于材料去除率 MRR 的影响,选取了低抛光压力,最终平均去除率仅为 $3.1 \mu\text{m}\cdot\text{h}^{-1}$ 。Zhou 等^[32]采用游离磨料加工的方法,对氮化铝陶瓷进行了研磨、抛光,先用不同磨粒大小的 Al_2O_3 进行研磨,再用 SiO_2 溶液(粒径为 50 nm)作为抛光液进行抛光,最终得到了表面粗糙度 R_a 为 6 nm 的光滑表面,同时发现由于热压烧结陶瓷内部留下的孔隙不利于表面粗糙度的降低。尹青等^[33]针对 CMP 抛光氮化铝陶瓷平坦性问题,系统研究了工艺参数和 pH 值等因素对抛光质量的影响,自行配置了抛光液,稀释后,在压力为 1.8 MPa、转速为 $60\cdot\text{min}^{-1}$ 、流速为 $340 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$ 条件下,得到表面粗糙度 R_a 为 28 nm,且无划痕的氮化铝陶瓷。Jung 等^[34]针对 PVT 法制成单晶氮化铝进行抛光研究。先利用不同颗粒大小的金刚石磨粒进行抛光(Diamond Mechanical Polishing, DMP),使用超声波清洗机将晶片表面残留的金刚石杂质清理后,采用 SiO_2 研磨液和 SUBA 600 抛光垫进行 CMP 抛光,并利用光学显微镜和 AFM 进行形貌观察,最终得到良好的加工表面。

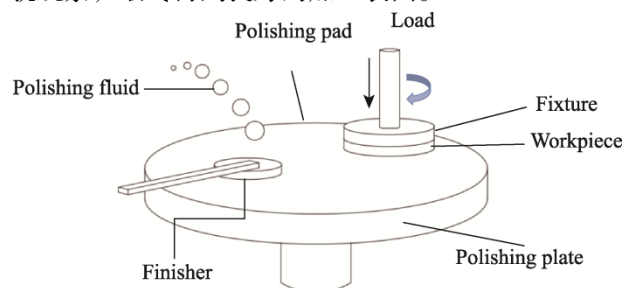


图 2 化学机械抛光工作原理图

Fig. 2 Working principle of chemical mechanical polishing

在化学机械抛光中,材料的去除是通过化学和机械综合作用,加工后的氮化铝表面容易出现微裂纹,产生亚表面损伤。此外,在抛光工艺中,研磨液易造成污染,需要专门工艺处理,并且磨料容易对抛光垫造成磨损,需要定期对抛光垫修正。目前,用于氮化铝的磨料、抛光垫种类、抛光工艺不如碳化硅成熟,有待进一步深入研究。

2.2 氮化铝陶瓷磁流变抛光工艺

磁流变抛光(Magnetorheological Finishing, MRF)工作原理如图 3 所示。运动盘在磁极正上方,工件位于运动盘上方并保证工件与运动盘之间有一定的距离,施加磁场时,在该空隙处会形成高强度的梯度磁场。运动盘内有大量磁流变液,抛光开始时,磁极发生强大磁场致使磁流变液从牛顿流体变成黏度较大的 Bingham 流体。在这个过程中,磁流变抛光液中的磁性粉粒会沿着磁场分布线形成链状结构,抛光中的磨料会依附在铁粉链状结构表面,从而具有强剪切力,在工件运动过程中,通过流体动压剪切实现工件表面的材料去除^[35]。该技术最早由 Kordonski 等^[36]提出并用来加工石英凸球面工件和玻璃元件,得到的样品表面粗糙度 R_a 分别为 0.8 nm、1.0 nm,从此该技术便在精密加工领域获得广泛应用。李敏等^[37]进行氮化铝陶瓷磁流变抛光工艺性研究,采用自制的水基磁流变工作液稳定剂,研抛盘转速设为 $80 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$,加工时间设为 6 min,研抛压力设为 25 kPa,实验发现随磁场强度的增大,氮化铝陶瓷基片加工效果显著改善。白振伟等^[38-39]提出集群磁流变效应研磨加工氮化铝陶瓷基片,选用 SiO_2 磨料#4000 进行粗磨实验,研究了磨粒浓度和研磨盘转速的影响,最终使表面粗糙度达到 $0.029 \mu\text{m}$,下降了两个数量级,材料去除率为 $2.8 \mu\text{m} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

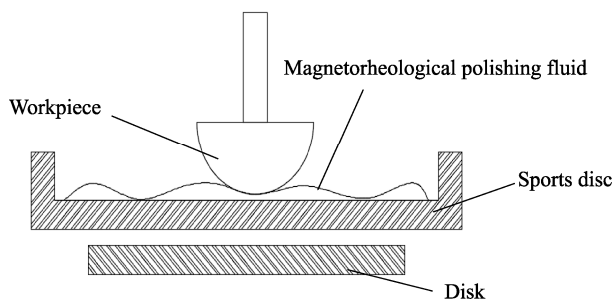


图 3 磁流变抛光工作原理图

Fig. 3 Working principle of magnetorheological polishing

磁流变抛光技术是介于接触式抛光与非接触式抛光的一种抛光方法。其与传统抛光方法相比,具有抛光精度高,无刀具磨损、堵塞现象,去除

率高且不引入亚表面损伤等优点。但是磁流变液在使用过程中由于导磁粒子因相互摩擦存在磨损,磁流变液在使用期间需要密封,导致制备过程复杂、成本高昂,不利于大规模产业化使用,一般该方法用于光学零件加工的最后一道工序。

2.3 氮化铝陶瓷的 ELID 磨削工艺

电解内修整(Electrolytic In-process Dressing, ELID)辅助磨削^[40-41]的工作原理如图 4 所示。砂轮通过电刷接电源正极,根据砂轮的形状制造一个导电性能良好的电极接电源的负极,电极与砂轮表面之间有一定的间隙,从喷嘴中喷出的具有电解作用的磨削液进入间隙后,在电流的作用下,砂轮的金属基体作为阳极被电解,使砂轮中的磨粒露出表面,形成一定的出刀距离和容屑空间。随着电解过程的进行,在砂轮表面逐渐形成一层钝化膜,阻止电解过程的继续进行,使砂轮损耗不致太快,当砂轮表面的磨粒磨损后,钝化膜被工件材料刮擦去除继续进行,以对砂轮表面进一步修整。上述过程是一个动态平衡过程,既避免了砂轮的过快消耗又自动保持了砂轮表面的磨削能力。

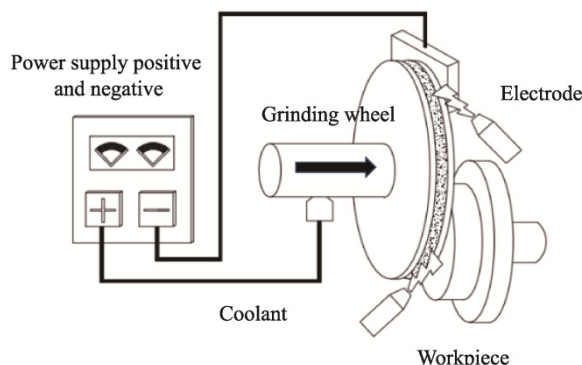


图 4 ELID 磨削原理工作图

Fig. 4 ELID grinding principle working diagram

Katahira 等^[42]详细地研究了氮化铝陶瓷的磨削特性,使用不同的粒度大小的砂轮磨削,发现砂轮粒度越细,表面粗糙度改善幅度越大,在使用不同粒度大小的砂轮过程中发现了不同的脆性破坏模式,其主要机制是晶界的破坏。他将磨削与传统的使用氧化铝作为磨粒的抛光进行了比较,结果发现使用#30000 砂轮进行磨削,表面粗糙度 R_a 为 8 nm,非常光滑,并且 ELID 磨削后的工件表面硬度和光滑程度优于传统抛光工件,经分析这是 ELID 磨削造成的氧元素扩散现象。Suzuki 等^[43]使用面珩磨方法(全接触磨削)加工氮化铝陶瓷,采用陶瓷结合剂砂轮进行半精加工和树脂结合剂砂轮进行精加工,实现了氮化铝陶瓷

的高效晶面磨削, 由于在使用陶瓷结合剂砂轮磨削时, 工件表面存在 AlN 晶粒剥落的现象, 为此, 他们还进行了单颗磨粒压痕实验, 实验结果发现当划痕深度低于 $0.3\ \mu\text{m} \sim 0.5\ \mu\text{m}$ 时, 能明显减少 AlN 晶粒剥落和开裂现象。Li 等^[44]研究了氮化铝陶瓷的超精密磨削表面质量、脆性和韧性去除过程中的损伤特征, 主要通过纳米压痕实验揭示了氮化铝陶瓷的材料性能和损伤机理, 研究发现, 氮化铝陶瓷脆韧临界转变深度约 $90\ \text{nm}$, 使用 #5000 的金刚石砂轮进行精磨, 加工后的表面粗糙度 R_a 为 $3\ \text{nm}$, 临界切削深度的提出为以后在氮化铝陶瓷基片上进行韧性磨削提供了理论依据。关于国内外 ELID 磨削的工艺参数如表 2 所示。

ELID 磨削技术是将传统磨削、研磨、抛光结合为一体的复合镜面加工技术, 具有高效性、工艺简单、磨削质量高等特点, 并且使用的磨削液为弱电解质的水溶液, 对机床和工件没有腐蚀作用, 装置简单, 适合推广。但在磨削过程中由于修正电流的变化容易导致氧化层不连续, 工件表面容易不平整, 磨削工件容易产生烧伤、残余应力、裂纹等缺陷。

2.4 氮化铝陶瓷激光加工

激光加工是一种无接触加工、无刀具磨损、高精度以及灵活性强的先进加工技术, 是适合脆硬型陶瓷材料的一种加工方法^[45]。其工作原理是光能通过透镜聚焦后达到极高的能量密度, 使材料在高温下分解, 如图 5 所示。激光加工方法成本低、效率高, 但是难以控制产品的精度和表面质量^[46]。

Nedyalkov 等^[47]利用波长为 $1064\ \text{nm}$ 的 YAG 激光器对氮化铝陶瓷进行纳秒激光加工, 在其表面形成了一个波纹结构的导电层, 便于以后的切削加工。王海龙等^[48]采用飞秒激光对氮化铝陶瓷进行表面加工实验。实验结果发现, 最优激光能量密度为 $10\ \text{J}\cdot\text{cm}^{-2} \sim 14\ \text{J}\cdot\text{cm}^{-2}$, 扫描速度 $20\ \text{mm}\cdot\text{s}^{-1} \sim 30\ \text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$, 实现了圆孔无微裂纹、无崩边的高质量加工, 验证了飞秒激光能提高表面加工质量的

可行性。Chen 等^[49]采用超短脉冲加工氮化铝和氧化铝, 研究发现, 由于氮化铝和氧化铝的热扩散系数和热膨胀系数的不同导致其脉冲的烧蚀深度差异较大。Chen 等^[50]研究了激光扫描速度对氮化铝陶瓷表面形貌、化学成分和性能的影响, 以及激光辅助 AlN 与 Cu 连接的机理。随着激光扫描速度的增加, 氮化铝陶瓷的表面粗糙度降低。

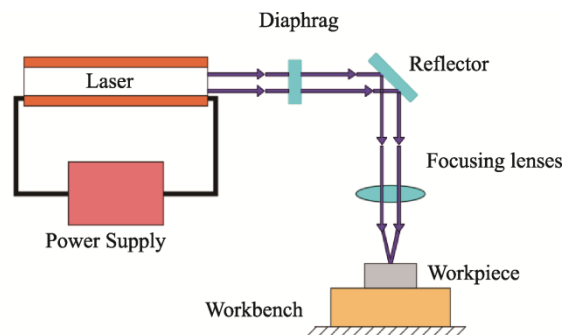


图 5 激光加工原理工作图

Fig. 5 Working diagram of laser processing principle

2.5 氮化铝陶瓷等离子辅助抛光工艺

等离子辅助抛光 (Plasma Assisted Polishing, PAP) 是一种干式抛光技术。由于其结合了等离子体辐照对表面进行改性, 可通过超低压或者使用软磨料去除改性层^[51], 因而常被用于加工难处理材料。其工作原理图如图 6 所示。该装置包括由铝合金制成的上下金属电极、密封圈、Ar 与 CF_4 等离子体构成的磨石以及上下旋转装置所构成, 回转泵用于降低该区域等离子体产生所需的压力。Deng^[52]利用 PAP 对氮化铝陶瓷进行抛光, 经等离子体照射后, 材料表面硬度大大降低, 相对于化学机械抛光, 得到了无凹坑且粗糙度为 $0.1\ \text{nm}$ 的原子级平坦化表面。Sun 等^[53]对氮化铝陶瓷基片进行 PAP 抛光, 发现施加高抛光负荷, 容易造成 AlN 发生晶粒脱落, 工件表面产生凹坑, 粗糙度增大, 采用超低抛光压力 ($800\ \text{Pa}$), 可获得表面粗糙度 R_a 为 $3\ \text{nm}$ 、MRR 为 $500\ \text{nm}\cdot\text{h}^{-1}$ 的光

表 2 国内外 ELID 磨削的工艺参数表

Tab. 2 ELID grinding process parameters at home and abroad

Mechanism	Material size	R_a	Wheel mesh size	Feed rate	Grinding fluid
RIKEN	—	$0.008\ \mu\text{m}$	#30000 Cast iron bonded diamond	$2\ \mu\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$	Chemical solution type grinding fluid
Tohoku	$2.54\ \text{mm} \times 2.54\ \text{mm}$	$0.039\ \mu\text{m}$	SD8000V	$2\ \mu\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$	Soluble type
DLUT	$10.00\ \text{mm} \times 10.00\ \text{mm} \times 0.38\ \text{mm}$	$0.003\ \mu\text{m}$	#5000 diamond cup wheels	$3\ \mu\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$	Deionized water

滑表面。随后，Sun 等^[54]提出利用 CF₄ 等离子体和玻璃化结合磨石的新型高效无磨损抛光技术，在抛光过程中由于陶瓷结合剂磨石表面负载过重，易失去抛光能力，需要每过 30 min 休整一次，大幅提高了 MRR。

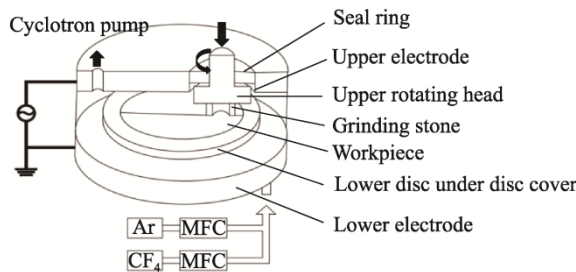


图 6 等离子辅助抛光原理图
Fig. 6 Schematic diagram of plasma assisted polishing

目前，等离子体辅助抛光由于受磨石的影响，材料的去除率相对于其他加工工艺较低，并且 PAP 的加工设备昂贵，不适用于大规模加工。

2.6 氮化铝陶瓷复合抛光工艺

对于典型的硬脆性材料，非接触式的加工方法，如化学腐蚀和激光抛光等，往往存在环境污染、加工成本高、加工效率低等问题。与之相比，接触式的磨粒加工方法包括金刚石磨削和游离磨粒抛光，虽然加工效率高，工件形状精度好，但会引入严重的表面和亚表面损伤，只适合粗加工，必须搭配刻蚀或抛光工序来实现损伤层的去除和应力释放。从上述分析可以看出，单一的加工方法无法同时具有各种优势，上述各种单一抛光工艺比较如表 3 所示。为提高氮化铝陶瓷基板加工表面质量和加工效率，国内外学者也采用多种加

工手段进行复合抛光技术研究，常见的复合抛光工艺^[55]有超声振动辅助磨削、超声波磨料水射流抛光以及超声辅助固结磨粒化学机械抛光等。苗新刚等^[56]采用超声振动辅助磨料水射流(Abrasive Waterjet Machining, AWJ)改善硬脆材料的加工性能。研究发现，使用#80 的石榴石磨粒可以使表面粗糙度从 2.50 μm 降至 2.36 μm，实验结果还表明，MRR 和加工效率均获得提高。李庚卓等^[57]设计了一种新型高效环保的平坦化方法(椭圆超声辅助固结磨粒化学机械抛光方法)用来取代金刚石磨削和化学机械抛光。他们通过选择适当的结合剂将软质磨粒固结成块来实现固结磨粒干式化学机械抛光，对氮化铝陶瓷进行抛光实验，结果表明，与传统化学机械抛光相比，椭圆超声的存在明显提高了工件表面粗糙度和材料去除率。

3 氮化铝陶瓷的亚表面损伤机理研究

氮化铝陶瓷是一种多晶材料，由大量 AlN 晶粒液相烧结而成，后续需经研磨抛光等过程才能得到高质量的加工表面。氮化铝陶瓷是典型的脆硬型材料，在加工过程中容易出现一系列的表面/亚表面损伤，如严重的表面缺陷、裂纹和残余应力等，氮化铝陶瓷的加工损伤必然会严重影响半导体器件的性能。因此，研究氮化铝陶瓷在加工过程中的变形特征和损伤机理，对控制损伤、提高表面质量、增大材料去除率具有重大意义。Gao 等^[58]研究了应变速率效应对氮化铝陶瓷变形特性的影响机理，采用 Berkovich 压头进行了恒力单划痕变速纳米划痕试验。研究发现，在压头滑移处存在大量裂纹，变形特征主要为塑性流动和

表 3 氮化铝陶瓷各种加工工艺方法比较
Tab. 3 Comparison of various processing methods of aluminum nitride ceramics

Processing method	Processing effect	Processing characteristics	Material removal mechanism
Chemical mechanical polishing	$R_a \leq 8\text{nm}$, removal rate is $3.1\text{ }\mu\text{m}\cdot\text{h}^{-1}$, subsurface damage is $0.5\text{ }\mu\text{m}$	Simple operation, large processing area, high quality, subsurface damage	Chemical and mechanical synergy to remove materials.
Magnetorheological polishing	Minimum R_a is 0.6 nm , removal rate is $2.8\text{ }\mu\text{m}\cdot\text{h}^{-1}$.	High polishing precision, no tool wear and blockage and high cost	Gradient magnetic field causes shear force of magnetorheological fluid
ELID Grinding	R_a reaches 3 nm , the depth of damaged layer is $0.3\text{--}0.5\text{ }\mu\text{m}$	High efficiency simple process, uneven machined surface	Combination of grinding wheel dressing and grinding process
Laser processing	No microcracks and trimming defects	No contact processing, high-accuracy, low controllability	Material removal by focusing on photothermal effects
Ion assisted polishing	R_a is 3 nm and removal rate is $500\text{ nm}\cdot\text{h}^{-1}$.	Strong applicability, high efficiency and strong applicability, low removal rate	First radiate the surface, then remove it mechanically by ultra-low pressure or soft abrasive

脆性断裂。当划痕速度设为 $50 \mu\text{m}\cdot\text{h}^{-1}$ 时, 划伤槽内出现许多明显塑性流线, 说明高应变速率有利于氮化铝陶瓷的塑性流动。Zhang 等^[59]在对氧化氮铝材料进行超精密磨削时发现, 纳米压痕所获得的微观力学性能因表面晶粒的不同而不同, 由于晶粒取向不同, 材料的去除方式也随晶粒取向不同。Li 等^[44]研究超精密磨削氮化铝陶瓷的表面损伤特征, 通过多个纳米压痕实验证明表面不同深处的强度和硬度分布呈明显的各向异性, 晶界处于薄弱的位置, 脆性去除过程中的裂纹易导致氮化铝晶粒的脱落, 还发现氮化铝陶瓷脆韧转变的临界深度约为 90 nm, 为以后在氮化铝陶瓷上进行韧性磨削的可能性提供了理论依据。

4 总结与展望

氮化铝陶瓷作为理想的电子器件封装基板材料, 存在巨大市场价值, 氮化铝陶瓷超精密加工后的高质量加工表面是保证电子功率器件持久稳定进行的前提。目前, 化学机械抛光仍是氮化铝陶瓷最主要的平坦化超精密加工方法, 并以其他超精密加工方法为辅。由于氮化铝陶瓷属于典型脆硬型材料, 现阶段精密加工技术仍存在以下问题。

(1) 现有 CMP、ELID、PAP、MRF 等加工工艺都不具有批量生产的优越性, 氮化铝陶瓷加工成本一直居高不下。

(2) 化学机械抛光中的研磨液、磨料、抛光垫种类较少, 加工效率偏低。研发新型研磨液、磨料、抛光垫材料利于提高加工效率, 降低成本。

(3) AlN 陶瓷材料去除过程中的演变机理已经取得一些进展, 但目前超精密加工氮化铝陶瓷的表面损伤形成机理尚不够明确, 氮化铝陶瓷实现延性加工临界条件尚不明确, 在表面质量和加工效率约束下, 加工工艺参数选择尚未明确, 需进行深入的研究, 为实现氮化铝陶瓷高效低损伤精密加工提供技术支撑。

参考文献:

- [1] 郝跃. 高效能半导体器件进展与展望[J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版), 2021, 33(6): 885–890.
HAO Y. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications (Natural Science Edition), 2021, 33(6): 885–890.
- [2] 吴军, 李抒智, 杨卫桥, 等. 功率型 LED 散热器的研究[J]. 半导体技术, 2010, 35(10): 964–960, 1027.
WU J, LI S Z, YANG W Q, et al. Semiconductor

- Technology, 2010, 35(10): 964–960, 1027.
- [3] 杨宏宇, 舒世立, 刘林, 等. 半导体激光器模块散热特性影响因素分析[J]. 半导体光电, 2016, 37(6): 770–775.
YANG H Y, SHU S L, LIU L, et al. Journal of Semiconductor Optoelectronics, 2016, 37(6): 770–775.
- [4] 顾长志, 金曾孙, 吕宪义, 等. 使用金刚石膜热沉的半导体激光器特性研究[J]. 半导体学报, 1997(11): 840–843.
GU C Z, JIN Z S, LYU X Y, et al. Chinese Journal of Semiconductors, 1997(11): 840–843.
- [5] 刘海华. 热压烧结氮化铝陶瓷制备工艺的研究[D]. 福州大学, 2018.
- [6] SLACK G A, MCNELLY T F. Growth of high purity AlN crystals [J]. Journal of Crystal Growth, 1976, 34(2): 263–279.
- [7] 蓝键, 马思琪, 李邑柯, 等. 氮化铝粉末制备与应用研究进展[J]. 陶瓷学报, 2021, 42(1): 44–53.
LAN J, MA S Q, LI Y K, et al. Journal of Ceramics, 2021, 42(1): 44–53.
- [8] 吕帅帅, 周宇翔, 倪威, 等. 高导热氮化铝陶瓷制备技术的研究现状及发展趋势[J]. 陶瓷学报, 2018, 39(6): 672–675.
LYU S S, ZHOU Y X, NI W, et al. Journal of Ceramics, 2018, 39(6): 672–675.
- [9] WEI Z L, XIE W, GE B, et al. Enhanced thermal conductivity of epoxy composites by constructing aluminum nitride honeycomb reinforcements [J]. Composites Science and Technology, 2020, 199(2): 108304.
- [10] ZHENG J J, HE S J, WANG J, et al. Performance of dilucene rubber composites filled with aluminum nitride and alumina tri-hydrate [J]. Materials, 2020, 13(11): 2489.
- [11] 张永清, 阴生毅, 高向阳, 等. 新型高热导率氮化铝基微波衰减陶瓷研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2020, 49(2): 655–660.
ZHANG Y Q, YIN S Y, GAO X Y, et al. Rare Metal Materials and Engineering, 2020, 49(2): 655–660.
- [12] 步文博, 丘泰, 徐洁, 等. AlN-C(石墨)复相材料微波衰减性能的研究[J]. 电子元件与材料, 2003(2): 1–3.
BU W B, QIU T, XU J, et al. Electronic Components and Materials, 2003(2): 1–3.
- [13] CRISTIAN C, HUI Y, QIAN Z, et al. Aluminum nitride cross-sectional lamé mode resonators [J]. Journal of Microelectro Mechanical Systems, 2016, 25(2): 275–285.
- [14] QIAN Z, HUI Y, LIU F, et al. Graphene-aluminum nitride

- NEMS resonant infrared detector [J]. *Microsystems and Nano Engineering*, 2016, 2(1): 16026.
- [15] 陈凯文. 基于氮化铝的双波段可调 DFB 激光器的设计[D]. 南京邮电大学, 2017.
- [16] 诸政, 吕世涛, 张敦宇, 等. 环形氮化铝压电 MEMS 谐振器的支撑结构设计研究[J]. *传感器与微系统*, 2022, 41(3): 24–27, 35.
ZHU Z, LYU S T, ZHANG A Y, et al. *Sensors and Microsystems*, 2022, 41(3): 24–27, 35.
- [17] ASGHAR K, DAS D. Effect of polishing parameters on abrasive free chemical mechanical planarization of semi-polar (1122) aluminum nitride surface [J]. *Journal of Semiconductors*, 2016, 37(3): 119–125.
- [18] MIWA K, FUKUMOTO A. First-principles calculation of the structural, electronic, and vibrational properties of gallium nitride and aluminum nitride [J]. *Physical Review B Condensed Matter*, 1993, 48(11): 7897–7902.
- [19] 张乃夫. AlN 和 hBN 晶体生长及表征[D]. 中国科学院大学, 2021.
- [20] KOLAKLIEVA L, CHITANOV V, SZEKERES A, et al. Pulsed laser deposition of aluminum nitride films: correlation between mechanical, optical, and structural properties [J]. *Coatings*, 2019, 9(3): 195.
- [21] KIM K, LAMBRECHT W R L, SEGALL B. Elastic constants and related properties of tetrahedrally bonded BN, AlN, GaN, and InN [J]. *Physical Review B*, 1996, 53(24): 16310–16326.
- [22] GERLICH D, DOLE S L, SLACK G A. Elastic properties of aluminum nitride [J]. *Journal of Physics & Chemistry of Solids*, 1986, 47(5): 437–441.
- [23] THOKALA R, CHAUDHURI J. Calculated elastic constants of wide band gap semiconductor thin films with a hexagonal crystal structure for stress problems [J]. *Thin Solid Films*, 1995, 266(2): 189–191.
- [24] HE Q, QIN M L, HUANG M, et al. Mechanism and kinetics of combustion-carbothermal synthesis of AlN nanopowders [J]. *Ceramics International*, 2017, 42(12): 8755–8762.
- [25] CHUNG S L, YU W L, LIN C N. A self-propagating high-temperature synthesis method for synthesis of AlN powder [J]. *Journal of Materials Research*, 1999, 14(5): 1928–1933.
- [26] MACKENZIE M, CRAVEN A J. Quantifying the oxidation of AlN using electron energy loss spectroscopy [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2010, 33(14): 1647–1655.
- [27] ROUNAGHI S A, RASHID A R K, ESHGHI H, et al. Formation of nanocrystalline h-AlN during mechanochemical decomposition of melamine in the presence of metallic aluminum [J]. *Journal of Solid State Chemistry*, 2012, 190: 8–11.
- [28] OGNJANOVIĆ S M, WINTERER M. Optimizing particle characteristics of nanocrystalline aluminum nitride [J]. *Powder Technology*, 2017, 326: 488–497.
- [29] WU N C, TSAI M S, WANG M C, et al. The morphology and formation mechanism of aluminum nitride nanocrystals synthesized by chemical vapor deposition [J]. *Journal of Crystal Growth*, 2000, 208(1): 189–196.
- [30] TAKAHASHI Y, KIKUCHI M, SUZUKI S, et al. Transmission electron microscopy of surface damages resulting from wet polishing in a polycrystalline aluminum nitride substrate [J]. *Journal of the Ceramic Society of Japan*, 2010, 99(1151): 613–619.
- [31] FILATOV Y D, SIDORKO V I, KOVALEV S V, et al. Formation of flat surfaces of optoelectronic components in diamond polishing [J]. *Journal of Superhard Materials*, 2017, 39(2): 129–133.
- [32] ZHOU Z Z, YUAN J L, LV B H. Study on the finishing process for the aluminum nitride substrates [J]. *Advanced Materials Research*, 2009, 69/70: 282–286.
- [33] 尹青, 张国玲, 唐会明, 等. SiO₂ 抛光液对 AlN 基片抛光性能的影响 [J]. *微纳电子技术*, 2010, 47(6): 376–380.
YIN Q, ZHANG G L, TANG H M, et al. *Micronanoelectronic Technology*, 2010, 47(6): 376–380.
- [34] LEE J H, PARK C W, PARK J H, et al. Optimization of chemical mechanical polishing for bulk AlN single crystal surface [J]. *Journal of the Korean Crystal Growth and Crystal Technology*, 2018, 28(1): 51–56.
- [35] 王嘉琪, 肖强. 磁流变抛光技术的研究进展[J]. *表面技术*, 2019, 48(10): 317–328.
WANG J Q, XIAO Q. *Surface Technology*, 2019, 48(10): 317–328.
- [36] KORDONSKI W, GOLINI D. Progress update in magnetorheological finishing [J]. *International Journal of Modern Physics B*, 1999, 13(14/15/16): 2205–2212.
- [37] 李敏. 集群磁流变效应与聚氨酯酯复合研抛加工机理及实验研究[D]. 广东工业大学, 2011.
- [38] 白振伟, 阎秋生, 路家斌, 等. 氮化铝基片的集群磁流变抛光加工[J]. *金刚石与磨料磨具工程*, 2011, 31(5): 35–38.
BAI Z W, YAN Q S, LU J B, et al. *Diamond & Abrasives Engineering*, 2011, 31(5): 35–38.
- [39] 白振伟, 周旭光, 刘俊龙, 等. 氮化铝陶瓷基片的集群磁流变效应研磨加工[J]. *金刚石与磨料磨具工程*,

- 2012, 32(3): 18–23.
- BAI Z W, ZHOU X G, LIU J L, et al. Diamond & Abrasives Engineering, 2012, 32(3): 18–23.
- [40] 张飞虎, 朱波, 栾殿荣, 等. ELID 磨削硬脆材料精密和超精密加工的新技术[J]. 宇航材料工艺, 1999, 29(1): 51–55.
- ZHANG F H, ZHU B, LUAN D R, et al. Aerospace Materials & Technology, 1999, 29(1): 51–55.
- [41] WANG Z Q, CHENG Z R, GUANG C, et al. Influence of oxide layer on grinding quality in ELID grinding bearing outer ring raceway with workpiece-cathode [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 105(7/8): 3045–3056.
- [42] KATHHIRA K, OHMORI H, UEHARA Y, et al. ELID grinding characteristics and surface modifying effects of aluminum nitride (AlN) ceramics [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2005, 45(7): 891–896.
- [43] SUZUKI S, KURIYAGAWA T, YAN J W, et al. Grain exfoliation and control thereof in ultra-precision plane honing of AlN substrates [J]. International Journal of Machining and Machinability of Materials, 2007, 2(1): 37–49.
- [44] LI H G, KANG R K, GAO S, et al. Surface damage characteristics of AlN ceramics induced by ultra-precision grinding [J]. Materials and Manufacturing Processes, 2022, 37(14): 1610–1617.
- [45] 梅雪松, 杨子轩, 赵万芹. 电子陶瓷基板表面激光孔加工综述[J]. 中国激光, 2020, 47(5): 187–202.
- MEI X S, YANG Z X, ZHAO W Q. China Journal of Lasers, 2020, 47(5): 187–202.
- [46] 陈妮, 韦佳伟, 张鑫磊, 等. 激光改性后氮化铝基板的可加工性研究[J]. 中国机械工程, 2021, 32(23): 2817–2822.
- CHEN N, WEI J W, ZHANG X L, et al. China Mechanical Engineering, 2021, 32(23): 2817–2822.
- [47] NEDYALKOV N N, DIKOVSKA A, NIKOV R, et al. Laser-induced periodic structure formation in AlN ceramic [J]. Optics and Laser Technology, 2021, 144: 107402.
- [48] 王海龙, 李铁, 王宏建. 氮化铝陶瓷的飞秒激光表面加工及制孔应用[J]. 半导体光电, 2021, 42(5): 668–671.
- WANG H L, LI T, WANG H J. Semiconductor Optoelectronics, 2021, 42(5): 668–671.
- [49] CHEN B C, HO C Y, WEN M Y, et al. Ultrashort-laser-pulse machining characteristics of aluminum nitride and aluminum oxide [J]. Ceramics International, 2015, 41: S191–S196.
- [50] CHEN N B, CHEN B, LIU D, et al. Joining of nanosecond laser irradiation modified-AlN and Cu [J]. Ceramics International, 2021, 47(19): 27979–29986.
- [51] DENG H, YAMAMURA K. Atomic-scale flattening mechanism of 4H-SiC (0001) in plasma assisted polishing [J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2013, 62(1): 575–578.
- [52] DENG H, ENDO K, YAMAMURA K. Plasma-assisted polishing of gallium nitride to obtain a pit-free and atomically flat surface [J]. CIRP Annals, 2015, 64(1): 531–534.
- [53] SUN R Y, YANG X, ARIMA K, et al. High-quality plasma-assisted polishing of aluminum nitride ceramic [J]. CIRP Annals, 2020, 69(2): 301–304.
- [54] SUN R Y, NOZOE A, NAGAHASHI J, et al. Novel highly-efficient and dress-free polishing technique with plasma-assisted surface modification and dressing [J]. Precision Engineering, 2021, 72: 224–236.
- [55] 万宏强, 韩佩瑛, 葛帅, 等. 工件表面超声振动抛光方法发展概况[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2018, 38(2): 94–100.
- WAN H Q, HAN P Y, GE S, et al. Diamond & Abrasives Engineering, 2018, 38(2): 94–100.
- [56] 苗新刚, 武美萍, 缪小进. 基于硬脆材料的磨料水射流抛光技术研究[J]. 液压气动与密封, 2016, 36(3): 4–6.
- MIAO X G, WU M P, MIAO X J. Hydraulics Pneumatics & Seals, 2016, 36(3): 4–6.
- [57] 李庚卓. 先进硬脆材料的椭圆超声辅助固结磨粒化学机械抛光研究[D]. 哈尔滨工业大学, 2019.
- [58] GAO S, LI H, KANG R, et al. Effect of strain rate on the deformation characteristic of AlN ceramics under scratching [J]. Micromachines, 2021, 12(1): 77.
- [59] ZHANG C Y, GUO B, ZHAO Q L, et al. Ultra-precision grinding of AlON ceramics: Surface finish and mechanisms [J]. Journal of the European Ceramic Society, 2019, 39(13): 3668–3676.

(编辑 梁华银)