

DOI: 10.13957/j.cnki.tcx.2023.06.004

引文格式:

姚忠樱, 常逸文, 崔 鸽, 等. 陶瓷基板抛光技术研究现状[J]. 陶瓷学报, 2023, 44(6): 1093–1102.

YAO Zhongying, CHANG Yiwen, CUI Ge, et al. Research status of ceramic substrate polishing technologies [J]. Journal of Ceramics, 2023, 44(6): 1093–1102.

陶瓷基板抛光技术研究现状

姚忠樱, 常逸文, 崔 鸽, 张洪波, 任瑞康, 任佳乐, 旷峰华

(中国建筑材料科学研究总院 陶瓷科学研究院, 北京 100024)

摘 要: 随着集成电路和半导体行业的快速发展, 具有高表面精度和低粗糙度的陶瓷基板成为封装基板的最佳选择, 而抛光工序作为陶瓷基板生产过程中最为关键的环节, 决定了产品整体质量的好坏。围绕着陶瓷基板抛光, 包括化学机械抛光、磨料流抛光、超声振动辅助磨料流抛光、电泳抛光、电解抛光以及磁流变抛光等常见抛光技术的基本原理和适用范围, 总结了氧化铝、氮化硅、碳化硅、氧化铍、氮化铝等陶瓷基板常用的抛光技术及其研究现状, 并展望了陶瓷基板抛光技术的发展趋势。

关键词: 陶瓷基板; 抛光技术; 氧化铝; 氮化硅; 碳化硅; 氧化铍; 氮化铝

中图分类号: TQ174.75

文献标志码: A

文章编号: 1000-2278(2023)06-1093-10

Research Status of Ceramic Substrate Polishing Technologies

YAO Zhongying, CHANG Yiwen, CUI Ge, ZHANG Hongbo, REN Ruikang, REN Jiale, KUANG Fenghua

(Ceramics Science Institute, China Building Materials Academy, Beijing 100024, China)

Abstract: With the rapid development of integrated circuit and semiconductor industries, ceramic substrates with high surface accuracy and low roughness have become the best choice for packaging substrates, where the polishing process, as the most critical step in the production process, determines the overall quality of the of ceramic substrates. Focusing on the basic principles and application scope of common polishing technologies for ceramic substrates, including chemical mechanical polishing, abrasive flow polishing, ultrasonic vibration assisted abrasive flow polishing, electrophoretic polishing, electrolytic polishing, and magnetorheological polishing, this paper was aimed to summarize the commonly used polishing technologies and their research status for ceramic substrates, such as alumina, silicon nitride, silicon carbide, beryllium oxide and aluminum nitride. Besides, the development trend of ceramic substrate polishing technology will be discussed.

Key words: ceramic substrate; polishing technology; alumina; silicon nitride; silicon carbide; beryllium oxide; aluminum nitride

0 引 言

随着社会的发展, 工业的进步, 在轨道交通、电子电力和航空航天等领域对于功率器件的需求与日俱增。与金属、金属基复合材料以及树脂基片

相比, 陶瓷基板具有优良的导热性、电绝缘性、气密性、力学性能和介电性能等优点^[1], 被广泛用于集成电路、大功率半导体器件、通讯电子领域、LED 产业、锂电池、芯片、航天航空和国防军工等高科技领域^[2-3]。随着装备型号的发展, 对陶瓷基板的

收稿日期: 2023-05-26。

修订日期: 2023-09-21。

基金项目: 国家自然科学基金(52032011)。

通信联系人: 旷峰华(1984-), 男, 博士生, 教授级高级工程师。

Received date: 2023-05-26.

Revised date: 2023-09-21.

Correspondent author: KUANG Fenghua (1984-), Male, Doctoral candidate, Professorate senior engineer.

E-mail: fenghuakuang@163.com

表面粗糙度、平整度等提出了更为严苛的要求。

目前,已投入生产的陶瓷基板主要有氧化铝(Al_2O_3)、氮化硅(Si_3N_4)、碳化硅(SiC)、氧化铍(BeO)和氮化铝(AlN)等^[4-5]。陶瓷基板的硬度高、脆性大、容易产生裂纹、表面加工难度大。因此,对于陶瓷基板表面的加工要求更加严格,一般采用研磨抛光以去除基板表面的附着物、改善平整度、降低表面粗糙度,提高尺寸精度和表面质量,满足薄型化的要求^[6-7]。不同陶瓷材质的性能和结构存在差异,选择合适的抛光技术才能起到事半功倍的处理效果。

本文综合阐述了陶瓷基板典型的抛光技术,包括化学机械抛光、磨料流抛光、超声振动辅助磨料流抛光、电泳抛光、电解抛光以及磁流变抛光等常见抛光技术的基本原理和适用范围,列举了几种典型陶瓷基板的性能特点和应用领域,重点概述了 Al_2O_3 、 Si_3N_4 、 SiC 、 BeO 、 AlN 等陶瓷基板常用的抛光技术及其国内外的研究现状,并对陶瓷基板抛光技术的未来发展方向提出展望。

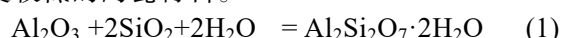
1 陶瓷基板的抛光技术分类

为了改善平整度,获得高表面精度、低表面粗糙度的陶瓷基板,首先通过研磨工序去除陶瓷基板表面的缺陷,加工变质层和划痕,再利用抛光技术进一步去除研磨过程中造成的表面或亚表面损伤,得到更低粗糙度的平整表面^[8-9]。常见的陶瓷基板的抛光技术分为化学机械抛光、磨料流抛光、超声振动辅助磨料流抛光、电泳抛光、电解抛光以及磁流变抛光等^[10],如表 1 所示。

1.1 化学机械抛光

化学机械抛光(Chemical Mechanical Polishing, CMP)最早可以追溯到 1965 年由 Monsanto 首次提

出 CMP 技术的概念^[11],该技术可以有效降低传统抛光过程造成的亚表面损伤,获得纳米级的面精度和亚纳米级的表面粗糙度。由于其独特的化学腐蚀和机械去除协同工艺,是目前能够实现全局平坦化的抛光技术之一,近年来受到广泛关注^[12]。在 CMP 抛光过程中,抛光液与基板表面发生化学反应,软化基板的同时通过机械研磨将被软化的表面去除^[13]。例如,在抛光 Al_2O_3 基板时,使用硅溶胶抛光液会发生化学反应如式(1)所示,生成物则会在机械磨抛过程中除去^[14]。这就意味着 CMP 过程更适用于可以发生界面反应且生成物硬度较低的陶瓷材料。



在 CMP 工艺中,通过调节抛光液和抛光参数,可以实现消除缺陷和划痕从而达到预期的加工效果。此外,抛光液中磨粒的形貌影响着材料的去除效果,相对圆润的磨粒更容易获得良好的抛光效果, CMP 工艺及磨粒划痕示意图如图 1 所示。

1.1.1 抛光液

作为 CMP 技术的关键性因素之一,抛光液一般由去离子水、磨料、氧化剂、分散剂以及 pH 值调节剂等添加剂组成。按照抛光液的类别,大体可以分为单晶/多晶金刚石抛光液、 SiO_2 抛光液、 Al_2O_3 抛光液、 SiC 抛光液和氧化铈(CeO_2)抛光液等稀土材料^[16]。CMP 抛光液主要起到抛光、润滑、冷却的作用。抛光液中磨料颗粒的大小、pH 值以及分散稳定性等问题直接影响抛光面的表面质量和抛光效率。

CMP 抛光液按照酸碱度一般分为酸性和碱性两大类。在抛光液中加入酸或者无机盐作为添加剂可以提高材料的去除率。目前,硝酸(HNO_3)、

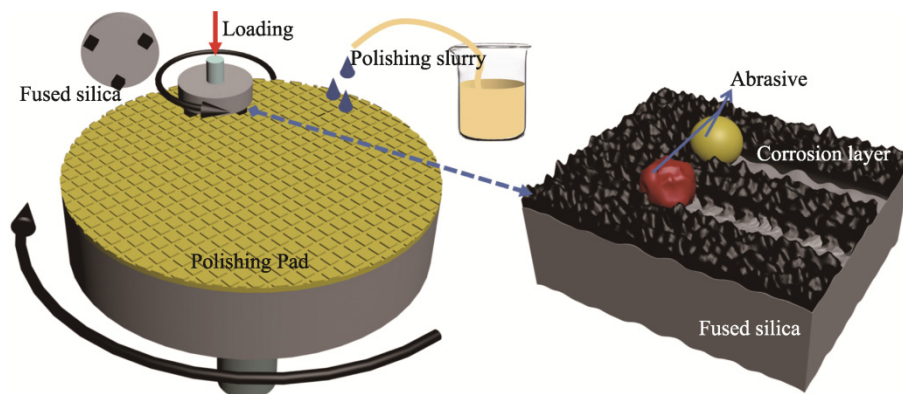


图 1 CMP 抛光工艺示意图^[15]

Fig. 1 Schematic diagram of CMP polishing process^[15]

硫酸(H_2SO_4)、氢氧化钠(NaOH)、氢氧化钾(KOH)等腐蚀性物质常用于生产强酸或碱性的 CMP 抛光液,用于难抛光的材料。卢海参等^[17]使用丙酰酞氯对 Al_2O_3 抛光液进行了表面改性,显著提高了 Al_2O_3 抛光液的分散性,减少了团聚作用。抛光液中也常常添加一些化学试剂用于调节抛光液的 pH 值,以保证抛光过程化学反应的进行。Xie 等^[18]在 SiO_2 抛光液中加入了等量的一元酸(硝酸、盐酸、甲酸、乙酸)、二元酸(硫酸、草酸)、三元酸(柠檬酸)和无机盐作为添加剂,虽然这些添加剂提高了抛光效率,但强酸强碱不仅会腐蚀抛光设备,威胁操作人员的安全,还会对环境造成不可逆的破坏。因此,开发高效、环保的 CMP 方法和绿色抛光解决方案迫在眉睫。

1.1.2 抛光垫

抛光垫是 CMP 抛光过程中的重要消耗品之一,一般需要具备适当的刚性和多孔吸水特性,是决定抛光表面质量和抛光效率的重要辅料^[19]。抛光垫一般都带有不同形状的沟槽,能够帮助传输磨料和提高抛光均匀性,主要有三种类型,聚氨酯抛光垫、无纺布抛光垫和复合型抛光垫^[20]。抛光垫的主要作用是存储、传输抛光液,对被加工工件提供一定压力并对其表面进行机械摩擦。

1.2 超声振动辅助磨料流抛光

超声波振动与电子放电、等离子体和激光类似,可以在很短的时间内释放大量能量,并广泛应用于硬脆性材料的加工^[21]。通过将超声振动和磨料流抛光技术相结合,利用超声振动系统把超声振动作用于磨料流,结合两者的动能完成抛光加工的一种新的复合抛光方式,被命名为超声振动辅助磨料流抛光(UVAFP)。图 2 为超声辅助磨料流抛光示意图^[22]。工作过程中,压电陶瓷在超声电源的驱动下利用换能器带动变幅杆与工具产生超声频振动。随后,工具端面把超声振动传递给磨料流。在超声振动作用下,磨料流对被加工工件表面的冲击作用得到了明显的增强,实现了被加工表面的高效抛光加工^[23]。超声的引入有利于微气泡的形成与破灭,而工件表面微气泡破灭的同时又有助于材料的脱落,得到更为精确的抛光表面。这一特性促使这种抛光技术特别适用于精密光学器件的表面抛光。

Yu 等^[24]利用控制磨料粒径,抛光头的给进和旋转速度以及超声频率,最终得到表面粗糙度为 2 nm 的半球体透镜。跟踪他们的长期工作不难发现,Zhang 等^[25]对 UVAFP 抛光技术进行了长期深

入研究,并分析了该技术对 Al_2O_3 表面性质的影响。结果发现,界面处 Al_2O_3 的应力随超声振幅的增加而快速变大,当振幅为 4 μm 时,陶瓷基板表面粗糙度 R_a 达到最小值。该实验室在后续工作中,详细分析了超声振动过程中压头倾斜角度对抛光深度的影响。结果发现,抛光移除能力正比于超声振幅,反比于抛光轨迹重合度^[26]。

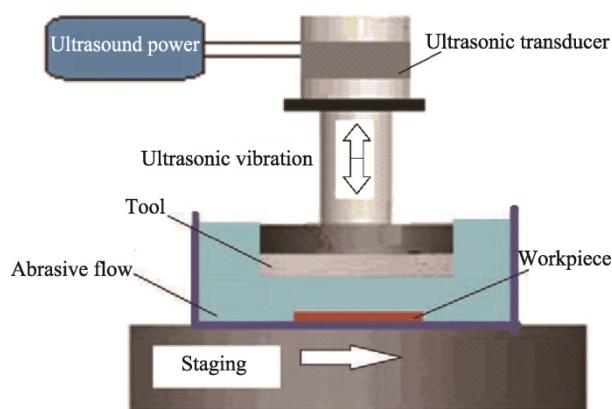


图 2 超声辅助磨料流抛光示意图^[22]

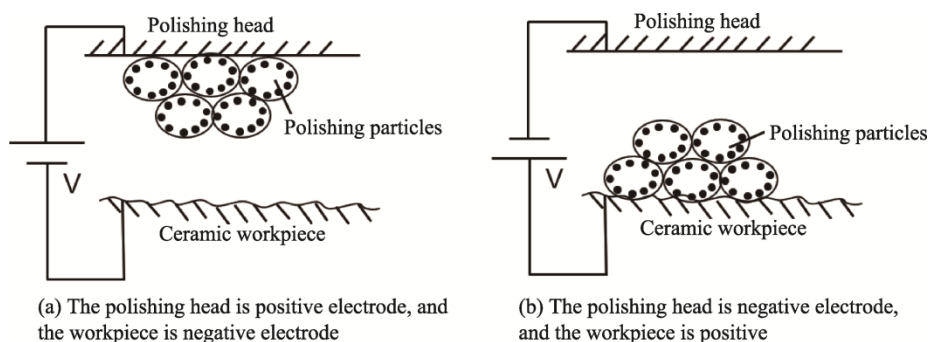
Fig. 2 Schematic diagram of ultrasonic assisted abrasive flow polishing process^[22]

1.3 电泳抛光

电泳抛光是一种极具潜力的非接触的抛光方法之一,该技术利用带电粒子在电场中移动速度不同而达到分离。图 3 是电泳抛光原理示意图,图 3(a)中陶瓷工件端为负极,抛光头为正极时,抛光粒子在电场力作用下向抛光头聚集,形成一个柔性磨粒层,当陶瓷工件旋转时,磨料与工件间会发生摩擦和碰撞,进而达到抛光的目的。图 3(b)中陶瓷工件为正极,抛光头为负极时,抛光粒子将在电场作用下向工件方向聚集,陶瓷工件和抛光头相对运动,抛光粒子对工件表面产生冲击碰撞,从而达到去除材料的目的^[27-28]。由于这种方法几乎对加工表面不产生机械加工常见的损伤,故最适合于功能陶瓷的超精密加工。江亲瑜等^[29]采用电泳抛光处理脆硬性的陶瓷材料表面,对抛光因素进行正交试验,结果表明抛光效率与电压和抛光时间成正比,与抛光间隙成反比。

1.4 电解抛光

为了改善金属表面的微观几何形状,降低金属表面的粗糙度,科研人员发明了一种新型的表面处理技术“电解抛光”^[30]。电解抛光利用电流和化学反应相组合,在电解液中以金属工件作为阳极,不溶性金属作为阴极,在两电极间加入电压,使阳极上的微凸起部分发生选择性溶解,降低表面粗糙度,生成光滑的表面。

图 3 电泳抛光原理示意图^[28]Fig. 3 Schematic diagram of electrophoretic polishing principle^[28]

抛光装置如图 4 所示, 电解抛光的原理可以用黏膜理论解释, 从工件上脱离的金属离子与电解液中的磷酸形成一层磷酸盐膜吸附在工件表面, 该磷酸盐膜在工件的凸起处较薄, 在凹陷处较厚。而凸起处的电流密度较高因而溶解快, 随着黏膜流动, 工件表面的粗糙度不断降低, 表面被逐渐修整光滑。电解抛光方法具有设备简单低廉、操作简单快速、生产效率高, 能够修整机械抛光无法抛到的凹陷处, 增加工件的抗腐蚀性等优点^[31]。

1.5 等离子体辅助抛光

等离子体辅助抛光(PAP)技术最早是由日本大阪大学的 Yamamura 于 2010 年提出^[32], 是一种超低压力的干法抛光技术, 图 5 为 PAP 的加工示意图。该技术将化学改性和物理去除相结合, 通过等离子体照射进行表面改性, 借助软磨料的摩擦作用去除材料, 打破了传统机械加工的局限, 可以获得原子级平坦表面, 不会造成亚表面损伤, 能够获得平整度较好的表面质量, 成功应用于多种难加工材料^[33], 如 SiC、AlN 等陶瓷材料。

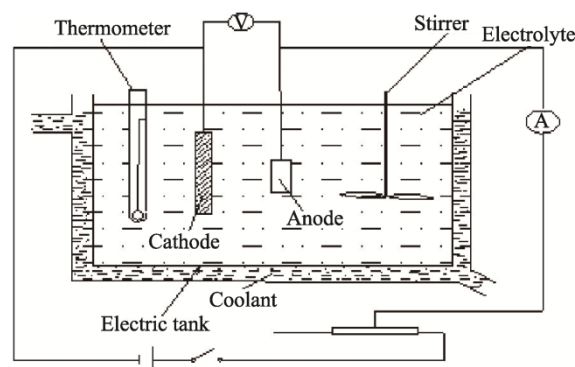
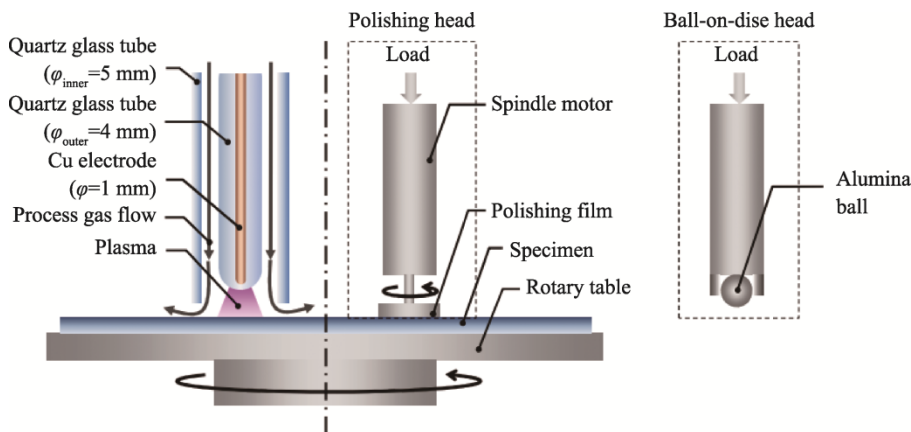
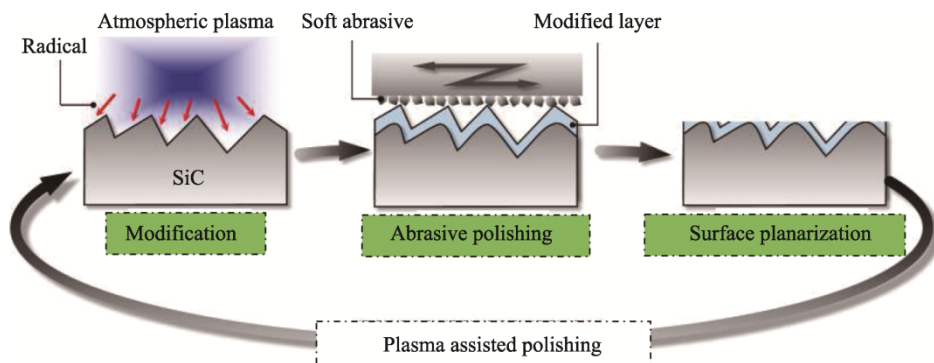
图 4 电解抛光装置图^[31]Fig. 4 Schematic diagram of electrolytic polishing device^[31]

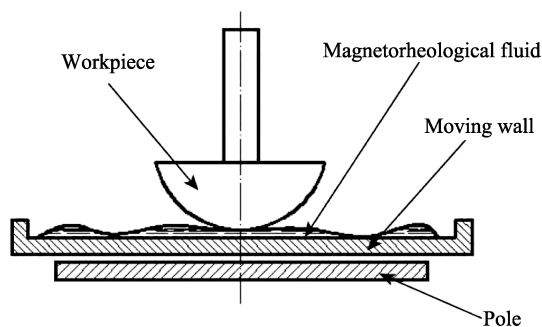
图 6 为 PAP 技术原理, PAP 技术中采用的等离子体在真空和高频电场下产生, 以惰性气体作为载气, 能够产生强氧化性自由基的气体(水蒸气、O₂、He 等)作为反应气体。抛光过程中, 反应气体产生的自由基与样品发生反应, 形成硬度较低的改性层。与此同时, 软磨料(如 CeO₂)不断地对氧化层进行机械切削抛光, 最终获得光滑无损伤的原子级平坦表面^[34]。

图 5 PAP 加工示意图^[33]Fig. 5 Schematic diagram of PAP processing^[33]

图 6 PAP 技术原理图^[34]Fig. 6 Schematic diagram of PAP technology^[34]

1.6 磁流变抛光

磁流变抛光技术(MRF)是一种介于接触式抛光与非接触式抛光的一种抛光方法。图 7 为磁流变抛光工作原理示意图,这种方法将微米尺寸的铁磁性颗粒分散在绝缘液相中形成磁流变液^[35]。磁流变液是一种新型的智能材料,具有优异的流变性能和力学性能,在未加磁场时流变特性与普通牛顿流体相似,当受到一定强度的磁场作用时,会产生明显的磁流变效应^[36-37]。在磁场中,发生流变的磁流变液流经工件与运动盘形成的小间隙时,会对接触部位的工件表面产生很大的剪切力,进而对工件产生切削抛光,使工件表面的材料被高效地去除^[38]。与传统的加工方法相比,磁流变抛光技术具有加工面形精度高、加工过程易于控制、磨头无磨损、表面粗糙度小、表面损伤小、无亚表面损伤以及可精确控制力等优点,因此多应用于加工要求高的精密和超精密领域,最常应用于光学加工领域,特别适合中、小口径 $\Phi 50\text{ mm}$ 以下光学元件的快速抛光^[39],具有广阔的应用前景。

图 7 磁流变抛光工作原理示意图^[39]Fig. 7 Schematic diagram of the working principle of magnetorheological polishing^[39]

石峰等^[40]使用自主研制的磁流变抛光机床和水基磁流变抛光液以去除直径为 100 mm 的 K9 材料平面玻璃的磨削亚表面损伤层,通过 156 min 的磁流变粗抛和 17.5 min 的磁流变精抛,平面玻璃的

表面粗糙度 R_a 达到 0.575 nm 。实验结果表明,应用磁流变抛光可以高效去除磨削产生的亚表面损伤层,并实现近零亚表面损伤和纳米级精度抛光的工艺目标。白杨等^[41]配制了两种适用于 K9 玻璃和 Si 材料的磁流变抛光液,经过实验证明,这两种磁流变抛光液都具有良好的稳定性和材料去除效率。

2 不同材质的陶瓷基板抛光

2.1 Al_2O_3 陶瓷基板抛光

Al_2O_3 陶瓷基板具有机械强度高、硬度大、耐高温、耐腐蚀、光透过率高、化学稳定性和耐热冲击性能高,绝缘性和与金属附着性良好,是目前电子技术领域中综合性能较好、应用最广泛的陶瓷材料,占陶瓷基板总量的 90% ^[42]。

Al_2O_3 陶瓷基板可以通过机械抛光先进行粗抛,去除大的麻点和划痕,再通过 CMP 精抛,表面达到纳米级粗糙度水平,Qu 等^[14]对比了不同磨料在 CMP 抛光过程中与 M 面蓝宝石的作用机理,结果发现葡萄糖酸钠(Gluc)能够与之反应生成柔软的 $\text{Al}(\text{OH})_4^-/\text{Gluc}^-$,同时, Al_2O_3 又能够和 SiO_2 抛光液形成柔性的 $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_7 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$,进一步提升抛光效率。 Al_2O_3 陶瓷基板也可以使用单面研磨抛光机和双面研磨抛光机。陈建新等^[43]通过单面研磨抛光和双面研磨抛光对 Al_2O_3 陶瓷基板进行抛光,结果表明单面抛光的抛光效率与表面质量均优于双面抛光,采用 W0.5 的 SiC 磨料可以获得平均表面粗糙度 R_a 为 10 nm 的光滑表面。王卫芳等^[44]对 Al_2O_3 陶瓷基板进行精密机械抛光,得出最佳抛光工艺参数。当 SiC 磨料的粒径为 $2\text{ }\mu\text{m}$,轴向载荷质量为 9 kg 、磨盘转速为 $90\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 、抛光液浓度为 35% 、连续研磨时间为 50 min 时,基板的表面粗糙度由原始的 $1.49\text{ }\mu\text{m}$ 下降至 $0.22\text{ }\mu\text{m}$,表面粗糙度改善率达到 85% 。表 2 列出了适用于 Al_2O_3 陶瓷基板常用的抛光方法。

表 1 适用于陶瓷基板的抛光方法
Tab. 1 Different polishing methods for ceramic substrates

Ceramic substrate	Characteristic	Polishing method	Ra
Al ₂ O ₃	High mechanical strength, high hardness, high temperature resistance, corrosion resistance	CMP	8.00 nm
		Single/double sided grinding and polishing	10.00 nm
		Picosecond polishing technology	0.32 μm
		Fracture peeling technology	2.18 μm
BeO	Low density, low dielectric constant, high flexural strength, high thermal conductivity, and toxicity	Double sided grinding and polishing	0.08 μm
SiC	Excellent thermal conductivity and high-temperature wear resistance, good chemical stability, low density, and low coefficient of thermal expansion	CMP	Decreased by 37.8%
Si ₃ N ₄	Non toxic, low dielectric constant, high Fracture toughness, high temperature resistance, corrosion resistance, strong impact resistance	CMP	3.39 nm
AlN	High thermal conductivity, excellent corrosion resistance, low dielectric constant and loss, non-toxic	CMP	7.00 nm
		MRF	37.80 nm
		PAP	3.00 nm

同时,皮秒抛光技术也非常适用于 Al₂O₃ 陶瓷的抛光。传统的激光抛光不是直接去除表面材料,而是需要对超快激光激发的纳米颗粒进行再结晶。激发的纳米粒子熔化重结晶,在陶瓷表面形成一层致密的细晶结构,导致表面粗糙度降低,不同于传统的激光抛光技术,皮秒抛光不使用连续激光加热材料表面使之蒸发,而是通过波长短于光子—电子耦合的短波激光加热电子并将其激发。这样失去电子的阳离子就会因为静电斥力松动并被去除^[45]。Zhang 等^[46]将激光能量密度设定在 $5.09 \text{ J} \cdot \text{cm}^{-2}$,当扫描速度为 $800 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 、扫描间隔 10 μm 时,发现 Al₂O₃ 陶瓷的表面粗糙度 Ra 从 1.8 μm 下降到 0.32 μm 。另一方面,为了满足对于复杂平面的抛光需求,超声振动辅助抛光技术也广泛应用在 Al₂O₃ 陶瓷抛光中。Zhang 等^[47]研究了不同超声振幅下 Al₂O₃ 陶瓷在超声振动辅助抛光中的表面性质,发现抛

光面表面粗糙度 Ra 随超声振幅增大呈先减小后增大的趋势。另外, Yan ^[48]采用一种新型无损抛光 Al₂O₃ 的新方法—激光控制的断裂剥离技术抛光 Al₂O₃ 陶瓷,实验结果表明,该技术可以完全去除切割表面上的重铸层。抛光表面没有缺陷,具有与基材相似的微观结构,并且抛光表面的粗糙度 Ra 达到 2.18 μm 。

2.2 BeO 陶瓷基板抛光

BeO 陶瓷基板属于高导热陶瓷材料之一,因具有低密度、低介电常数、高抗折强度、高绝缘性能、热导率高(热导系数可达 $310 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)等特点,被广泛用于军事通讯、光电技术、遥感遥测、电子对抗等领域。但是 BeO 陶瓷粉体有剧毒,对身体健康和环境危害较大,因此限制了它的发展^[49]。目前,美国是全球主要的 BeO 陶瓷基板生产和消费国,福特和通用等汽车公司在点火装置中大量使用 BeO 陶瓷基板。

通过传统的抛光技术只能获得表面粗糙度约 0.08 μm 的 BeO 陶瓷基板,主要原因就是 BeO 孔隙率高,致密性差,在抛光过程中,被抛光面容易被划伤,难以满足亚微米级及以下的薄膜电路的发展要求。王刚等^[50]采用双面研磨抛光机对 BeO 陶瓷基板进行抛光,先采用 W0.3 粒径的金刚石抛光液在铸铁盘上粗抛,后采用 W0.1 粒径的金刚石抛光液在聚氨酯衬的底盘上精抛,表面粗糙度 Ra 可达到 0.08 μm ,平面度在 $\pm 0.03 \text{ μm}$ 以内,能够满足薄膜电路/器件对高导热陶瓷抛光基

表 2 Al₂O₃ 陶瓷基板常用抛光方法

Tab. 2 Common polishing methods for Al₂O₃ ceramic substrates

Polishing method	Polishing effect
Single sided grinding and polishing machine (W0.5 SiC abrasive)	Ra reaches 10 nm
Ultrasonic vibration assisted polishing	Ra decreases first and then increases as the ultrasound amplitude increases
Picosecond polishing technology	Ra from 1.8 μm drops to 0.32 μm
Laser controlled fracture peeling technology for polishing	Ra reaches 2.18 μm

板高可靠性、高精度的发展需求，整体性能水平到达国际先进水平。

2.3 SiC 陶瓷基板抛光

SiC 陶瓷基板具有优异的热导率 and 高温耐磨性、化学稳定性好、密度低、热膨胀系数低，常用于高散热、高导热、大电流、大电压以及需要高频率运作的产品，是一种在信息产业和电子器件中具有广泛应用前景的陶瓷材料，作为一种典型的脆硬材料，在加工过程中常出现较大的表面缺陷和严重的亚表面损伤。

Luo 等^[51]采用 CMP 抛光方法，通过铝金属盘和 SiC 界面接触并用 1 wt.% 的 Na_2SO_4 盐溶液作为抛光液，产生电化学腐蚀将 4H-SiC 界面软化为 SiO_2 ，这使材料移除率提高 105%，表面粗糙度降低 37.8%。Pan 等^[52]使用含 SiO_2 磨料的 H_2O_2 碱性溶液进行抛光，测试发现 H_2O_2 能够提升抛光速率，但是 H_2O_2 浓度过高或者过低会导致基板表面出现凹坑缺陷，认为是反应层的形成与去除过程难以达到平衡导致的。除此之外，Feng 等^[53]通过超精密磨削实验，研究了反应烧结碳化硅 (RB-SiC) 和无压烧结碳化硅 (S-SiC) 的材料去除特性，分别采用目数为 120#、600#、2000# 和 12000# 金刚石杯形砂轮进行粗磨、半成品磨、细磨和精磨。结果表明：当使用 #2000 金刚石砂轮研磨 RB-SiC 和 S-SiC 陶瓷时，可以获得约 Ra 为 3 nm 的表面粗糙度和小于 8 nm 的凹槽深度，满足了大多数高性能应用的要求。Jiang 等^[54]提出了一种利用阳极氧化辅助抛光加工 RB-SiC 陶瓷的新方法。通过 RB-SiC 陶瓷的阳极氧化，可以降低氧化样品的硬度，并且在磨料抛光的辅助下容易加工软氧化物层。Li 等^[55]通过纳米压痕技术，分析了 SiC 磨削轨迹，建立了 UVAG 磨削力的理论模型。单因素实验表明，磨削力随着磨削深度、进给速度和超声振幅的增加而增加，而随着主轴转速的

增加而减小，磨削深度和进给速度对磨削力的影响大于超声波振幅和主轴速度。对比实验结果表明，与普通磨削相比，UVAG 有利于改善表面质量，减少亚表面损伤深度。表 3 列出了 SiC 陶瓷基板常用抛光方法。

2.4 Si_3N_4 陶瓷基板抛光

Si_3N_4 陶瓷基板无毒、介电常数低、机械性强、断裂韧性高、耐高温、耐腐蚀、耐冲击性能强，热膨胀系数与单晶硅相匹配，在汽车减震器、发动机、车用 IGBT 等产品，以及轨道交通、航空航天等领域广泛应用。

李庆忠等^[56]研究了不同 SiO_2 抛光液配制参数对精细雾化 CMP 抛光 Si_3N_4 陶瓷基板的抛光效果的影响。试验结果表明：当加入 5 wt.% 的 SiO_2 磨料、1 wt.% 的 H_2O_2 氧化剂、pH 值调节为 8 时，通过精细雾化 CMP 抛光的 Si_3N_4 陶瓷基板的材料去除率为 $108.24 \text{ nm} \cdot \text{min}^{-1}$ ，表面粗糙度 Ra 为 3.39 nm，与传统 CMP 抛光接近，但是节省了抛光液的用量，仅为传统抛光液用量的 1/9。沃德^[57]发明了一种酸性含水性抛光液用于 CMP 技术抛光 Si_3N_4 陶瓷，抛光液主要由 CeO_2 、非聚合物型不饱和氮杂环化合物、聚氧化烯聚合物和水组成。与此类似，朱忠良^[58]采用 CeO_2 、 Cr_2O_3 、 Al_2O_3 以及水组成的 CMP 抛光液抛光 Si_3N_4 陶瓷，抛光速度快且时间短，提高了生产效率，降低制造成本，获得光滑的抛光面，显著提高 Si_3N_4 陶瓷的表面质量。除了化学机械抛光技术外，Zhang 等^[59]提出了一种激光宏微观组合结构磨削方法。通过测试表明，使用这种方法的磨削力和表面粗糙度分别比使用常规磨削时的磨削力和表面粗糙度低 31% 和 40%。

2.5 AlN 陶瓷基板抛光

AlN 陶瓷基板作为一种高导热陶瓷材料，热导率可达 $150 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \sim 230 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ，是 Al_2O_3 陶瓷的 8 倍以上^[60]。并且 AlN 陶瓷基板与 Si、SiC、GaAs 等半导体芯片材料热膨胀系数匹配，散热性能优良、耐腐蚀性能优异、介电常数和介电损耗低、无毒，可以满足大型集成电路的散热需求，是一种适合组装大型集成电路的高性能陶瓷基板，有望成为替代电子工业用陶瓷基板 Al_2O_3 、SiC 和 BeO 的极佳材料^[61]。

早在 1985 年，日本的一些企业就已经将 AlN 陶瓷基板投产使用^[62]。AlN 陶瓷基板主要应用于高端产业，因此对基板的厚度、面精度、表面粗糙度有很高的要求。由于 AlN 陶瓷硬度高、脆性

表 3 SiC 陶瓷基板常用抛光方法
Tab. 3 Common polishing methods for SiC ceramic substrates

Polishing method	Polishing effect
CMP	Material removal rate increased by 105% and Ra decreased by 37.8%
Anodizing assisted polishing	Reduce the hardness of oxidized samples and facilitate the processing of soft oxide layers
Ultrasonic vibration assisted grinding technology	Improve surface quality and reduce sub surface damage depth

大、易水解、加工难度大,传统的机械抛光会使晶粒从 AlN 表面脱落,严重影响基板的强度和性能^[63],难以实现 AlN 表面的超光滑抛光。为解决 AlN 陶瓷基板抛光工艺的问题,李丹^[64]结合传统化学抛光法和机械抛光法,并采用正交实验方法系统研究了 AlN 陶瓷基板的最佳抛光工艺为 pH 值为 11、抛光头的压力为 0.55 MPa、抛光盘转速为 40 r·min⁻¹。白振伟等^[65]发现集群磁流变抛光加工 AlN 基板可以实现高效率超光滑抛光,基板经过抛光 60 min 后,粗糙度从 1.7302 μm 降至 0.0378 μm。Sun 等^[66]对烧结后的 AlN 陶瓷基板表面进行了等离子体辅助抛光和无等离子体照射抛光的比较。通过应用等离子体辅助抛光可以获得 500 nm·h⁻¹ 的材料去除率,是无等离子体照射抛光的两倍。在精抛实验中,获得了表面粗糙度 Ra 为 3 nm 的光滑 AlN 表面。

还有一些科研人员巧妙地利用 AlN 易与水反应这一特点,采用溶胶—凝胶(SG)法对 AlN 陶瓷基板抛光,例如:吕小斌等^[67]采用一种半固结磨料抛光工具“溶胶凝胶抛光膜”对 AlN 基板进行加工。实验结果得出 AlN 基板粗抛阶段宜采用溶胶凝胶抛光膜干法抛光,精抛阶段宜采用溶胶凝胶抛光膜湿法抛光进行加工,达到较高的表面质量。在粗抛阶段中机械作用力占主导,精抛阶段中水合作用占主导。表 4 列出了 AlN 陶瓷基板抛光方法。

表 4 AlN 陶瓷基板抛光方法
Tab. 4 Polishing methods for AlN ceramic substrates

Polishing method	Polishing effect
CMP	Ra reaches 7 nm
Cluster magnetorheological polishing	Ra reaches 37.8 nm
Plasma assisted polishing	The material removal rate is 500 nm·h ⁻¹ ; Ra reaches 3 nm

3 总结与展望

陶瓷基板作为集成电路和覆铜板的衬底材料,其表面质量直接影响后端器件的使用寿命和作用可靠性,为了满足器件集成化、小型化和高可靠性的发展要求,未来对陶瓷基板表面质量的要求会愈发严苛,应用的陶瓷基板表面处理技术也面临着越来越严苛的挑战。本文从陶瓷基板常用抛光技术出发,综述了 Al₂O₃、AlN、SiC、BeO 以及 Si₃N₄ 等陶瓷基板典型抛光技术的最新研究

进展,随之也发现了一些问题和规律。

(1) 按照接触方式的不同,可以将抛光方法分为三类,即接触式抛光(机械抛光、化学机械抛光)、非接触式抛光(电泳抛光、电解抛光、等离子体辅助抛光;)以及介于接触式和非接触式的抛光方法(磁流变抛光)。研发生产过程中,需要根据陶瓷基板的材质以及表面要求,选择不同的抛光方法或复合抛光方案。

(2) Al₂O₃、AlN、SiC 陶瓷基板的抛光工艺研究相对较多, Si₃N₄ 和 BeO 陶瓷基板抛光工艺研究相对较少,需要开展进一步的系统研究。其中, BeO 因其粉体具有毒性,对人体和环境危害较大,将会被其他陶瓷基板替代。

(3) CMP 抛光是陶瓷基板实现全局平坦化的主流抛光方法,但是 CMP 抛光过程的重要耗材,例如抛光液和抛光垫目前主要还是依赖进口,需要加快自主研发步伐。

参考文献:

- [1] 汤涛, 张旭, 许仲梓. 电子封装材料的研究现状及趋势[J]. 南京工业大学学报(自然科学版), 2010, 32(4): 105–110.
TANG T, ZHANG X, XU Z Z. Journal of Nanjing University of Technology (Natural Science Edition), 2010, 32(4): 105–110.
- [2] 曾祥勇, 许海仙, 朱家旭, 等. Ag-Cu-Ti 系合金钎焊陶瓷覆铜基板界面结合强度研究进展[J]. 陶瓷学报, 2022, 43(4): 539–550.
ZENG X Y, XU H X, ZHU J X, et al. Journal of Ceramics, 2022, 43(4): 539–550.
- [3] ZHANG X M, JI L F, ZHANG L T, et al. Polishing of alumina ceramic to submicrometer surface roughness by picosecond laser [J]. Surface & Coating Technology, 2020, 397: 125962.
- [4] 程浩, 陈明祥, 罗小兵, 等. 电子封装陶瓷基板[J]. 现代技术陶瓷, 2019, 40(4): 265–292.
CHENG H, CHEN M X, LUO X B, et al. Advanced Ceramics, 2019, 40(4): 265–292.
- [5] 廖圣俊, 周立娟, 尹凯俐, 等. 高导热氮化硅陶瓷基板研究现状[J]. 材料导报, 2020, 34(21): 21105–21114.
LIAO S J, ZHOU L J, YIN K L, et al. Materials Reports, 2020, 34(21): 21105–21114.
- [6] 潘飞, 王建彬, 徐慧敏, 等. 氮化铝陶瓷的超精密加工研究现状与发展趋势[J]. 陶瓷学报, 2023, 44(2): 208–216.
PAN F, WANG J B, XU H M, et al. Journal of Ceramics, 2023, 44(2): 208–216.
- [7] 林旭, 袁巨龙, 计时鸣, 等. 功能陶瓷超精密抛光技术的研究[C]// GAO D M, WANG D L, JIA Z Y, et al. 第五届海内外青年设计与制造科学会议论文集(第二卷). Brisbane, Australia: ICFDM' 2002 Program and Organising Committee, 2002: 291–295.
- [8] 祁婉婷. 固结磨料摩擦化学机械抛光单晶 SiC 基片微区富氧机制[D]. 河南科技学院, 2022.
- [9] 袁巨龙, 张飞虎, 戴一帆, 等. 超精密加工领域科学技术发展

- 研究[J]. 机械工程学报, 2010, 46(15): 161–177.
- YUAN J L, ZHANG F H, DAI Y F, et al. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(15): 161–177.
- [10] 赵栩欣, 欧忠文, 莫金川. 超光滑表面的加工方法[C]//第十二届全国表面工程·电镀与精饰年会暨 2014(重庆)国际表面工程论坛, 重庆, 2014: 90–93.
- [11] WALSH R J, HERZOG A H. Process for polishing semiconductor materials: 3170273 [P]. 1965-2-23.
- [12] 吕文利, 魏唯, 朱宗树, 等. 陶瓷衬底的化学机械抛光技术研究[J]. 电子工业专用设备, 2010, 39(3): 17–21.
- LYU W L, WEI W, ZHU Z S, et al. Electronic for Electronic Products Manufacturing, 2010, 39(3): 17–21.
- [13] 宋晓岚, 李宇焜, 江楠, 等. 化学机械抛光技术研究进展[J]. 化工进展, 2008, 27(1): 26–31.
- SONG X L, LI Y K, JIANG N, et al. Chemical Industry and Engineering Progress, 2008, 27(1): 26–31.
- [14] QU M H, NIU X H, HOU Z Y, et al. Effect of hydroxy carboxylates as complexing agent on improving chemical mechanical polishing performance of M-plane sapphire and action mechanism analysis [J]. Ceramics International, 2023, 49(6): 9622–9631.
- [15] XU G H, ZHANG Z Y, MENG F N, et al. Atomic-scale surface of fused silica induced by chemical mechanical polishing with controlled size spherical ceria abrasives [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2023, 85: 783–792.
- [16] 朱永伟, 王柏春, 许向阳, 等. 一种水基纳米金刚石抛光液及其制造方法: ZL1560161A [P]. 2005-1-5.
- [17] 卢海参, 雷红, 张泽芳, 等. 超细氧化铝表面改性及其抛光特性[J]. 润滑与密封, 2007, 32(2): 102–104.
- LU H S, LEI H, ZHANG Z F, et al. Lubrication and Sealing, 2007, 32(2): 102–104.
- [18] XIE W X, ZHANG Z Y, WANG L, et al. Chemical mechanical polishing of silicon wafers using developed uniformly dispersed colloidal silica in slurry [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2023, 90: 196–203.
- [19] 潘名军. 化学机械抛光中抛光垫修整技术的研究[D]. 大连理工大学, 2006.
- [20] 张楷亮. CMP 纳米抛光液及抛光工艺相关技术研究[D]. 中国科学院上海微系统与信息技术研究所, 2006.
- [21] CHEN L, ZHANG F H, MENG B B, et al. Material removal mechanism and grinding force modelling of ultrasonic vibration assisted grinding for SiC ceramics [J]. Ceramics International, 2017, 43(3): 2981–2993.
- [22] 李华, 任坤, 殷振, 等. 超声振动辅助磨料流抛光技术研究综述[J]. 机械工程学报, 2021, 57(9): 233–253.
- LI H, REN K, YIN Z, et al. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(9): 233–253.
- [23] 张占立, 张运瑞, 叶秀玲, 等. 氮化硅陶瓷滚子磁流变与超声波复合抛光技术[J]. 河南科技大学学报(自然科学版), 2014, 35(4): 13–17.
- ZHANG Z L, ZHANG Y R, YE X L, et al. Journal of Henan University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2014, 35(4): 13–17.
- [24] YU T B, AN J H, YANG X Z, et al. The study of ultrasonic vibration assisted polishing optical glass lens with ultrasonic atomizing liquid [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2018, 34: 389–400.
- [25] ZHANG C, LIANG Y D, CUI Z J, et al. Study on the effect of ultrasonic vibration-assisted polishing on the surface properties of alumina ceramic [J]. Ceramics International, 2022, 48(15): 21389–21406.
- [26] MENG F W, YU T B, MARIAN W, et al. Profile prediction for ultrasonic vibration polishing of alumina ceramics [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2023, 252: 108360.
- [27] 王佳焕, 邓乾发, 袁巨龙, 等. 基于介电泳效应的高速抛光电极分布仿真研究与实验验证[J]. 表面技术, 2020, 49(6): 314–322.
- WANG J H, DENG Q F, YUAN J L, et al. Surface Technology, 2020, 49(6): 314–322.
- [28] 江亲瑜, 葛宰林, 易风. 陶瓷材料非接触无损电泳抛光机理及影响因素分析[J]. 润滑与密封, 2001(6): 2–3.
- JIANG Q Y, GE Z L, YI F. Lubrication Engineering, 2001(6): 2–3.
- [29] 江亲瑜, 张继和. 功能陶瓷表面电泳抛光的实验研究[J]. 摩擦学学报, 2002, 22(4s): 476–478.
- JIANG Q Y, ZHANG J H. Tribology, 2002, 22(4s): 476–478.
- [30] 刘坤坤, 孙伶俐, 何声馨, 等. 316 不锈钢电解抛光最佳参数试验研究[J]. 表面技术, 2018, 47(8): 288–294.
- LIU K K, SUN L L, HE S X, et al. Surface Technology, 2018, 47(8): 288–294.
- [31] 张素银, 杜凯, 谌加军, 等. 电解抛光技术研究进展[J]. 电镀与涂饰, 2007, 26(2): 48–53.
- ZHANG S Y, DU K, CHEN J J, et al. Electroplating & Finishing, 2007, 26(2): 48–53.
- [32] YAMAMURA K, TAKIGUCHI T, UEDA M, et al. High-integrity finishing of 4H-SiC (0001) by plasma-assisted polishing [J]. Advanced Materials Research, 2010, 126/127/128: 423–428.
- [33] 陈家学. 单晶 SiC 等离子体辅助集群磁流变抛光加工研究[D]. 广东工业大学, 2021.
- [34] 吉建伟, 山村和也, 邓辉. 面向单晶 SiC 原子级表面制造的等离子体辅助抛光技术[J]. 物理学报, 2021, 70(6): 74–86.
- JI J W, YAMAMURA K, DENG H. Acta Physica Sinica, 2021, 70(6): 74–86.
- [35] 彭小强. 确定性磁流变抛光的关键技术研究[D]. 国防科学技术大学, 2004.
- [36] 沙树静, 胡锦飞, 张和权. 磁流变抛光技术发展[J]. 机械工程师, 2018(7): 5–8.
- SHA S J, HU J F, ZHANG H Q. Mechanical Engineer, 2018(7): 5–8.
- [37] 杨雪玲, 苏君. 磁流变抛光技术现状与进展[J]. 武汉理工大学学报, 2010, 32(24): 136–139.
- YANG X L, SU J. Journal of Wuhan University of Technology, 2010, 32(24): 136–139.
- [38] 张峰. 磁流变抛光技术的研究[D]. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2000.
- [39] 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.

- 317–328.
- [40] 石峰, 戴一帆, 彭小强, 等. 磁流变抛光消除磨削亚表面损伤层新工艺[J]. 光学精密工程, 2010, 18(1): 162–168.
SHI F, DAI Y F, PENG X Q, et al. Optics and Precision Engineering, 2010, 18(1): 162–168.
- [41] 白杨, 张峰, 邓伟杰, 等. 磁流变抛光液的配制及其抛光稳定性[J]. 光学学报, 2014, 34(4): 185–192.
BAI Y, ZHANG F, DENG W J, et al. Acta Optica Sinica, 2014, 34(4): 185–192.
- [42] 刘兵, 彭超群, 王日初, 等. Al_2O_3 陶瓷基片电子封装材料研究进展[J]. 中国有色金属学报, 2011, 21(8): 1893–1903.
LIU B, PENG C Q, WANG R C, et al. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2011, 21(8): 1893–1903.
- [43] 陈建新, 阎秋生, 潘继生. 氧化铝陶瓷基片高效减薄和超光滑抛光加工研究[J]. 机电工程技术, 2016, 45(10): 37–43.
CHEN J X, YAN Q S, PAN J S. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2016, 45(10): 37–43.
- [44] 王卫芳, 陆宝山, 关集俱. 氧化铝陶瓷的精密抛光性能研究[J]. 机床与液压, 2021, 49(14): 55–59.
WANG W F, LU B S, GUAN J J. Machine Tool & Hydraulics, 2021, 49(14): 55–59.
- [45] TSAI Y H, CHEN B C, HO C Y, et al. Ablation characteristics of femtosecond laser processing for nanometer-sized ceramic films [J]. Ceramics International, 2017, 43: S573–S577.
- [46] ZHANG X M, JI L F, ZHANG L T, et al. Polishing of alumina ceramic to submicrometer surface roughness by picosecond laser [J]. Surface & Coatings Technology, 2020, 397: 125962.
- [47] ZHANG C, LIANG Y D, CUI Z J, et al. Study on the effect of ultrasonic vibration-assisted polishing on the surface properties of alumina ceramic [J]. Ceramics International, 2022, 48(15): 21389–21406.
- [48] YAN Y Z, LI L, SEE T L, et al. CO_2 laser peeling of Al_2O_3 ceramic and an application for the polishing of laser cut surfaces [J]. Journal of the European Ceramic Society, 2013, 33(10): 1893–1905.
- [49] 李文芳, 黄小忠, 杨兵初, 等. 氧化铍陶瓷的应用综述[J]. 轻金属, 2010(2): 20–23.
LI W F, HUANG X Z, YANG B C, et al. Light Metals, 2010(2): 20–23.
- [50] 王刚, 尚华, 段冰. 薄膜电路用氧化铍陶瓷抛光基片的制作方法: ZL110105055B [P]. 2021-08-24.
- [51] LUO Y R, XIONG Q, LU J B, et al. Chemical mechanical polishing exploiting metal electrochemical corrosion of single-crystal SiC [J]. Materials Science in Semiconductor Processing, 2022, 152: 107067.
- [52] PAN G S, ZHOU Y, LUO G H, et al. Chemical mechanical polishing (CMP) of on-axis Si-face 6H-SiC wafer for obtaining atomically flat defect-free surface [J]. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 2013, 24(12): 5040–5047.
- [53] FENG G, GUO J B, ZHANG G J. Material removal characteristics of ultra-precision grinding silicon carbide ceramics [J]. Advances in Applied Ceramics, 2020, 119(4): 1–8.
- [54] JIANG G, SHEN X, JIAN T, et al. Oxidation characteristic and machining performance of reaction-sintered silicon carbide ceramic in anodically oxidation-assisted polishing [J]. International Journal of Electrochemical Science, 2016, 11(2): 1512–1529.
- [55] LI C, ZHANG F H, MENG B B, et al. Material removal mechanism and grinding force modelling of ultrasonic vibration assisted grinding for SiC ceramics [J]. Ceramics International, 2017, 43(3): 1–13.
- [56] 李庆忠, 高渊魁, 朱强. 精细雾化抛光氮化硅陶瓷的抛光液配制参数优化[J]. 材料科学与工程学报, 2018, 36(2): 282–285.
LI Q Z, GAO Y K, ZHU Q. Journal of Materials Science & Engineering, 2018, 36(2): 282–285.
- [57] W.沃德. 用于氮化硅材料的选择性抛光的组合物及方法: ZL108822737B [P]. 2021-06-22.
- [58] ZHANG X H, WEN D D, SHI Z Y, et al. Grinding performance improvement of laser micro-structured silicon nitride ceramics by laser macro-structured diamond wheels [J]. Ceramics International, 2020, 46(1): 795–802.
- [59] 朱忠良. 一种氮化硅陶瓷化学机械抛光的方法: ZL104263247B [P]. 2016-11-30.
- [60] 胡向洋, 汪荣昌, 顾志光, 等. 以氮化铝陶瓷为基板的倒扣封装工艺研究[J]. 固体电子学研究进展, 2001, 21(2): 211–215.
HU X Y, WANG R C, GU Z G, et al. Progress of Solid State Electronics, 2001, 21(2): 211–215.
- [61] 王超, 彭超群, 王日初, 等. AlN 陶瓷基板材料的典型性能及其制备技术[J]. 中国有色金属学报, 2007, 17(11): 1729–1738.
WANG C, PENG C Q, WANG R C, et al. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2007, 17(11): 1729–1738.
- [62] 张伟儒, 郑彧, 李正, 等. 半导体器件用陶瓷基片材料发展现状[J]. 真空电子技术, 2017(5): 20–23.
ZHANG W R, ZHENG Y, LI Z, et al. Vacuum Electronics, 2017(5): 20–23.
- [63] 李洪钢. LED 封装基板超精密磨削表面材料去除机理[D]. 大连理工大学, 2021.
- [64] 李丹. 氮化铝基板抛光工艺的正交实验研究[J]. 攀枝花学院学报, 2016, 33(5): 7–10.
LI D. Journal of Panzhihua University, 2016, 33(5): 7–10.
- [65] 白振伟, 阎秋生, 路家斌, 等. 氮化铝基板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.
- [66] SUN R Y, YANG X, ARIMA K, et al. High-quality plasma-assisted polishing of aluminum nitride ceramic [J]. CIRP Annals, 2020, 69(1): 301–304.
- [67] 吕小斌. SG 抛光膜水合抛光氮化铝的实验研究[D]. 华侨大学, 2018.

(编辑 王三海)