文章编号:1674-2974(2024)04-0140-13 DOI:10.16339/j.cnki.hdxbzkb.2024180

碳化硅衬底磨抛加工技术的研究进展与发展趋势

罗求发[1,3†],陈杰铭[1],程志豪[1],陆静[1,2]
(1. 华侨大学 制造工程研究院,福建 厦门 361021;
2. 华侨大学 脆性材料产品智能制造技术国家地方联合工程研究中心,福建 厦门 361021;
3. 高性能工具全国重点实验室,福建 厦门 361021)

摘 要:碳化硅衬底难加工的材料特性叠加其大尺寸化、超薄化的放大效应,给现有的加工技术带来了巨大的挑战,高效率、高质量的碳化硅衬底加工技术成了当下的研究热点.本文综述了碳化硅衬底机械磨抛加工技术和化学反应磨抛加工技术的研究进展,对比各类磨抛技术的特点,指出碳化硅衬底磨抛加工技术面临的挑战和发展趋势,以期为大尺寸碳化硅衬底的高质量、高效率、低成本加工提供新的思路和方法.

关键词:碳化硅;表面粗糙度;机械磨抛技术;化学反应磨抛技术;多能场辅助磨抛技术
中图分类号:TG74 **文献标志码**:A

Grinding and Polishing Technology for Silicon Carbide Substrate: State-of-the-art and Prospective

LUO Qiufa[1,3†], CHEN Jieming[1], CHENG Zhihao[1], LU Jing[1,2]
(1. Institute of Manufacturing Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China;
2. National & Local Joint Engineering Research Center for Intelligent Manufacturing Technology of Brittle Materials Products, Huaqiao University, Xiamen 361021, China;
3. National Key Laboratory of High Performance Tools, Xiamen 361021, China)

Abstract: The material characteristics of silicon carbide substrate, which are difficult to machine, coupled with its amplification effect of large-sized and ultra-thinned, pose a huge challenge to existing processing technologies. Consequently, the processing technology of high efficiency and high quality for silicon carbide substrate has become a current research focus. In this paper, the research progress of mechanical and chemical grinding and polishing technology for silicon carbide substrates is reviewed. The characteristics of various grinding and polishing technologies are compared. The challenge and development trend of grinding and polishing technologies of silicon carbide substrate is pointed out to provide new ideas and methods for high quality, high efficiency, and low-cost processing of large-size silicon carbide substrate.

* **收稿日期**:2023-10-19
基金项目:国家自然科学基金资助项目(52005190),National Natural Science Foundation of China(52005190);福建省自然科学基金资助项目(2021J05060),Natural Science Foundation of Fujian Province (2021J05060);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(ZQN-1022),Fundamental Research Funds for the Central Universities(ZQN-1022);国家自然科学基金联合基金重点资助项目(U22A20198),Key Projects of the National Natural Science Foundation Joint Fund (U22A20198)
作者简介:罗求发(1989—),男,福建龙岩人,华侨大学副教授,工学博士
† 通信联系人,E-mail:qfluo2014@hqu.edu.cn

Key words: silicon carbide; surface roughness; mechanical grinding and polishing technology; chemical reaction grinding and polishing technology; multi-energy field assisted grinding and polishing technology

碳化硅相较于第一、二代半导体材料具有更优良的热学、电学性能,如宽禁带、高导热、高温度稳定性和低介电常数等,这些优势使得以碳化硅为代表的宽禁带半导体材料广泛应用于高温、高频、高功率以及抗辐射等极端工况[1-7].作为高性能微电子和光电子器件制造的衬底基片,碳化硅衬底加工后的表面、亚表面质量对器件的使用性能有着极为重要的影响,因此,其加工不仅要保证较高的面型精度和亚纳米级的粗糙度,还要避免表面及亚表面损伤[8-14].碳化硅的主要加工过程分为切割、磨削/研磨以及抛光,其中磨削/研磨以及抛光这两道工序是决定碳化硅衬底最终加工质量优劣的关键工序.由于碳化硅被视为典型的硬脆性难加工材料,其加工过程面临着效率低、成本高以及对环境不友好等问题[15-20].为了获得满足要求的碳化硅衬底,研究人员开发了多种精密磨抛加工技术,根据材料去除方式的不同可以分为以机械去除为主的机械磨抛技术,以及以化学反应为主的化学反应磨抛技术.机械磨抛技术通过磨粒的机械作用或叠加特种能量的机械辅助作用来达到快速去除材料并获得良好表面质量的目的,化学反应磨抛技术先使衬底表面材料发生化学反应,形成较软的变质层,再利用磨粒划擦去除以获得亚纳米级粗糙度的表面质量.由于碳化硅晶体生长技术的限制,难以获得如硅、蓝宝石等超大棒料晶体,故未来的碳化硅衬底将朝着大尺寸、超薄化的方向发展,通过对磨抛加工技术的深入研究可以为其高效率、高质量、低成本加工提供新的思路和方法.

本文以研究第三代半导体碳化硅衬底磨抛加工技术为目的,综述了机械磨抛技术、化学反应磨抛技术的进展.根据去除机理的不同,划分并总结现有磨抛技术的特点:传统机械磨抛拥有较高的材料去除率,但是其加工质量较差,且损伤严重;而化学腐蚀反应磨抛的加工质量较好,但是较低的材料去除率是其亟待解决的难题;机械诱导反应磨抛以及特种能量辅助机械磨抛能够兼顾加工质量及加工效率,已经成为当下的研究热点之一.最后根据高质量、高效率、低成本、绿色发展的要求,对未来大尺寸、超薄化碳化硅衬底的磨抛加工技术进行了展望.

1　机械磨抛技术

由于碳化硅具有极高的化学稳定性,沿用硅晶圆的化学机械抛光方法难以获得较高的加工效率.因此,研究人员首先采用传统的机械去除方法以期快速去除前道工序引入的损伤层,并降低表面粗糙度[21].为了进一步提高加工效率和获得较高表面质量,研究人员引入特种能量辅助机械磨抛加工.

1.1　传统机械磨抛技术

从磨料运动方式来看,传统机械磨抛技术经历了从游离磨料研磨到固结磨料磨削的发展过程,碳化硅衬底的磨抛技术也随之不断发展和进步.

传统的游离磨料研磨主要通过研磨盘、工件和磨粒三者之间的相互作用,达到材料去除的目的,但因磨粒分布不均匀、运动轨迹不可控,难以保证碳化硅衬底的形状精度和表面质量.研究人员[22-23]使用不同的磨料对碳化硅进行加工,发现金刚石磨料拥有较好的材料去除率,且 Yu 等[23]发现研磨后的碳化硅的表面形状精度有了明显的改善.Yuan 等[24]研究不同粒径金刚石的加工效果,他们发现当金刚石粒径为0.5 μm时,可以获得最佳表面粗糙度 R_a=48.7 nm的碳化硅表面,且材料去除率为3.18 μm/h. Pan 等[25]使用金刚石砂轮磨削碳化硅衬底,可以得到表面粗糙度 R_a=12 nm,且晶圆整体厚度变化(Total Thickness Variation)<3 μm的碳化硅衬底.固结磨料磨削[26]通过使用固结磨料磨盘或砂轮的方式,可以有效提高磨粒利用率.但是由于磨粒出刃高度不一致,碳化硅表面会产生严重的划痕和表面、亚表面裂纹,加工后表面质量难以满足抛光前的要求.研究人员[27-28]通过使用超细磨料砂轮,以纳米磨削方式对碳化硅进行加工,可以获得 R_a=2 nm左右的表面粗糙度.Huo 等[29]使用纳米磨削加工碳化硅,可以获得小于1 μm的平面度.虽然纳米磨削可以获得较低的表面粗糙度,但是存在超细磨料砂轮制作成本高及制作难度大,且加工后仍然会存在亚微米深的裂纹、损伤层等

问题,这些都是其亟待解决的难题.作为高性能器件的载体,碳化硅衬底要求原子级的表面且无损伤层,研磨及磨削加工后的表面需要进一步通过抛光进行加工.由于抛光使用的是柔性加工工具,在一定程度上会破坏衬底平整度,所以对磨削加工后的翘曲度也有着较高的要求.研究人员[30-31]使用纳米级的金刚石磨粒对碳化硅衬底进行机械抛光,可以获得亚纳米级的表面粗糙度,但是需要花费较长的时间及较高的成本.抛光后的表面损伤及粗糙度虽有所改善,但加工后表面仍然会存在划痕,难以满足衬底原子级表面的要求.

典型机械磨抛技术的材料去除机理如图1所示,H_x为相同时间内不同加工方式的材料去除深度.纳米磨削使用的磨料一般为W1-10的金刚石,其材料去除率高,且表面质量较好,但是超细砂轮造价高导致加工成本较高,并且会残留亚微米深的损伤层.传统磨削使用的磨料一般为W50-100的金刚石,虽然磨料粒度要远高于纳米磨削时使用的磨料,但是由于传统磨削加工时,工具的转速过低,加工区域磨料线速度远低于纳米磨削中的线速度,所以其材料去除率小于纳米磨削,且加工后表面质量较差,损伤层厚达微米级.机械抛光使用的磨料一般为W0.1-3的金刚石磨料,加工后的表面质量较好,但存在划痕和较浅的亚表面损伤层.研磨使用的磨料一般为W0.5-20的金刚石和碳化硅,它的材料去除率及表面质量介于上述3种加工方法之间.

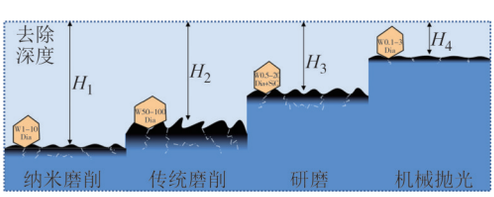


图1 典型机械磨抛技术的材料去除机理

Fig.1 The material removal mechanisms of typical mechanical grinding and polishing techniques

1.2 特种能量辅助机械磨抛技术

传统的机械磨抛技术可以实现对材料的高效去除,但是加工后较差的表面质量是当前急需优化的方向.为了解决这一难题,国内外学者引入特种能量来辅助机械磨抛加工,如图2所示.超声振动辅助磨削[32-34]主要通过对主轴添加超声振动的方式辅助磨削;激光辅助加工[35-37]通过激光照射碳化硅表面,达到降低其表面硬度的目的;电火花磨削[38-40]通过磨粒的间歇性放电实现对材料的去除.特种能量辅助机械磨抛技术在保证较高磨抛加工效率的同时,获得表面质量良好的碳化硅衬底,为超精密抛光加工节约工序余量.

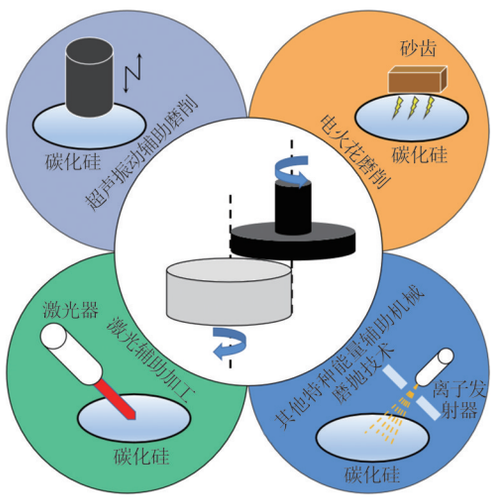


图2 不同特种能量辅助机械磨抛技术的原理

Fig.2 Principles of different special energy-assisted mechanical grinding and polishing techniques

超声振动辅助磨削(Ultrasonic Vibration Assisted Grinding, UVAG)是一种新型的精密加工技术,具有提高材料去除率、减小磨削力、提高加工精度和表面完整性等优点,特别是在硬脆材料精密加工中具有显著优势.曹建国等[41]研究了碳化硅的超声振动辅助磨削,他们认为超声振动会导致材料去除量增加,且有利于实现碳化硅衬底的塑性去除.Li等[42]通过超声振动磨削6H-SiC薄膜,可获得表面粗糙度低于23 nm的表面.振幅由超声电源的输出功率调节,但加工过程中的实际振动振幅会受到磨削力的影响[43],因此Chen等[44]提出一种在磨削过程中实时监控实际振动幅度的方法,该方法不受工具旋转、冷却液等外界因素的干扰和影响.

激光辅助加工(Laser Assisted Machining, LAM)具有材料损伤小、热影响区小等优点.通过激光预处理,能降低碳化硅的硬度,从而提高材料去除率,由于加工过程简单且效果显著,加工碳化硅等硬脆材料有很好的应用前景.Chen等[45]用激光照射碳化硅切割片的表面,降低碳化硅的硬度,使得磨削加工时的材料去除率得到了明显的提高.Luo等[46]使用激光辅助加工碳化硅,获得的表面粗糙度与传统磨削

相比降低了37%~40%,且亚表面损伤层厚度下降了22%~50.6%. Kim等[47]通过将CO_2激光源与机械抛光相结合,首次尝试在浆液环境中进行激光辅助抛光,提高了材料去除率. Abrego等[48]通过激光辅助加工可以使材料去除率相较于传统抛光提高43%. 虽然激光辅助加工的成本较高,但是可以显著提高加工质量及加工效率,同时可以实现混合加工,极大缩短加工时间并且减少加工步骤,是一种非常有前景的精密加工技术.

电火花磨削(Electrical discharge grinding, EDG)是通过石墨轮对工件的间歇放电实现材料的去除[49]. Yan等[50]先使用金刚石作为工具电极进行碳化硅的电火花加工,然后使用金刚石去除电火花加工过程中形成的2~3 μm厚的重铸层,加工后的表面粗糙度为1.85 nm. 电火花加工后,表面会残留较厚的再凝固层和热致微裂纹,为了去除凝固层以及微裂纹,需要在电火花加工后进行多次长时间的抛光处理,故抛光的经济、时间成本较高[51]. 因此,如何减小甚至消除电火花引起的凝固层及微裂纹是电火花磨削亟待解决的难题.

1.3　小 结

传统机械磨抛技术拥有较高的材料去除率,但较低的加工质量使得其只适用于充当超精密抛光的前一道工序,快速去除切割引入的损伤层,控制表面质量,为超精密抛光减少去除余量. 同时由于衬底翘曲度会对超精密抛光过程产生负面影响,在衬底翘曲度较大时,可能会导致衬底表面出现凹凸不平的区域,影响最终的加工质量和精度. 所以在快速去除的同时,还要保证较低的衬底翘曲度. 虽然引入特种能场的方式可以提高机械磨抛加工的加工质量,但同样难以获得满足质量要求的碳化硅衬底. 通过对特种能场加工机理的深入研究,并借助新型在线检测技术对加工过程进行实时监控,可以有效提高机械磨抛技术的加工质量. 同时,新的自动化、智能化设备的研发也有助于特种能场辅助机械磨抛技术向高质量化的方向发展.

2　化学反应磨抛技术

由于高质量的碳化硅衬底需要原子级的表面及较高的面型精度,传统的机械磨抛技术难以获得满足要求的碳化硅衬底. 化学反应磨抛技术通过化学腐蚀或者机械诱导的方式先使衬底表面材料变质钝化,再利用磨粒划擦实现材料去除,可以获得亚纳米级的表面粗糙度且减小甚至消除衬底的表面及亚表面损伤. 根据化学反应产生的方式分为以化学腐蚀为主的反应磨抛技术以及以机械诱导为主的反应磨抛技术. 以化学腐蚀为主的反应磨抛技术可以获得质量较高的表面,但是其材料去除率较低;而以机械诱导为主的反应磨抛技术可以在保证表面质量的同时,拥有较高的材料去除率.

2.1　以化学腐蚀为主的反应磨抛技术

以化学腐蚀为主的反应磨抛技术的核心是通过化学试剂或特种能场对碳化硅的表面进行氧化腐蚀,从而形成较软的变质层,再通过磨粒划擦将变质层去除. 这类反应磨抛技术以抛光加工为主,其中又细分为化学机械抛光[52-54]、电化学机械抛光[55-58]、等离子体辅助抛光[59-63]、紫外光辅助化学抛光[64]等不同类型的抛光方法.

2.1.1　化学机械抛光技术

目前业内最主流的化学腐蚀反应抛光技术是化学机械抛光技术(Chemical Mechanical Polishing, CMP),化学机械抛光技术是一种在加工过程中利用化学试剂腐蚀和磨粒机械去除复合的方法对衬底材料进行超精密加工的反应抛光技术,能够获得超光滑甚至无损伤的衬底表面. 为了提高化学机械抛光的材料去除率,研究者们分别从提高机械作用和提高化学作用两个方面进行了研究,如图3所示,通过使用较硬的磨料可以有效提高机械作用;改变抛光液的pH值或者加入氧化剂、催化剂可以提高化学作用.

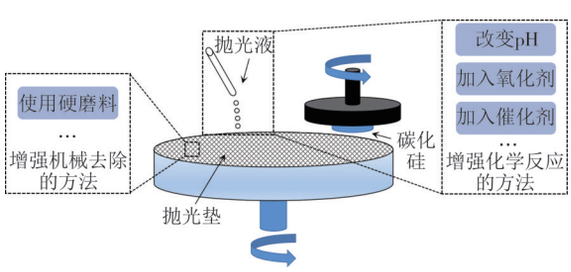


图3　提高CMP材料去除率的方法

Fig.3　Methods to enhance material removal rate in CMP

1)提高机械作用.Su等[65]使用Al_2O_3磨料对碳化硅进行抛光,能够得到0.36 μm/h的材料去除率,是使用SiO_2磨料的2倍以上.Heydemann等[66]使用金刚石磨粒对碳化硅进行化学机械抛光,发现材料去除率是只使用SiO_2磨料的10倍;当向SiO_2研磨液中同

时加入金刚石磨料和NaClO氧化剂后,其材料去除率提高了15倍,抛光后的表面粗糙度降低了6.28 nm. Lee等[67]使用含有SiO_2和金刚石磨粒的抛光液对碳化硅进行化学机械抛光,获得表面粗糙度为0.27 nm的碳化硅,且材料去除率约为1.8 μm/h.

2)提高化学作用. Zhou等[68]研究了pH值对CMP中化学腐蚀速率的影响,他们发现较高的pH值可以适当加快化学腐蚀速率进而提高材料去除率,在55 ℃且pH值为11的情况下,能够获得0.2 μm/h的最大材料去除率. Aida等[69]研究酸碱性研磨液对抛光碳化硅的影响,发现碱性适合抛光Si面,酸性适合抛光C面. Nitta等[70]发现添加胺之后的过氧化氢抛光液的材料去除率提高了1.7倍,比只使用磨粒的抛光液提高了8倍左右. 由于化学腐蚀速率对化学机械抛光的材料去除率有重要影响,所以研究者们采取了一系列方法来提高化学腐蚀的速率,如引入芬顿反应[71]及催化剂辅助刻蚀技术[72]. Kubota等[73]证实了芬顿反应提高化学机械抛光中的化学反应速率的可行性. Lu等[74]在碳化硅的CMP加工中引入芬顿反应,加工后获得表面粗糙度R_a为0.187 nm的原子级光滑表面,材料去除率为0.154 μm/h. Hara等[75]提出了催化剂辅助刻蚀技术(Catalyst Referred Etching, CARE)并且对碳化硅进行了加工,其原理是碳化硅被强氧化剂氧化为SiO_2,接着SiO_2与HF发生反应生成氟硅酸而被去除,从而达到超精密加工目的,加工后的表面平坦无划痕,且表面粗糙度只有0.076 nm,材料去除率为0.1~0.2 μm/h. Pan等[76]研究了不同催化剂的加工效果,结果表明当催化剂为氢氧化钾时,加工后的表面粗糙度为0.174 nm,材料去除率为0.105 μm/h.

从碳化硅的化学机械抛光研究中可以看出,通过提高加工中的机械作用以及化学作用都可以提高加工效率,也取得一定效果. 化学机械抛光中最主要的优化方向是平衡化学反应的速率以及机械去除的速率. 当化学反应的速率高于机械去除的速率时,就无法及时去除化学反应生成的软质SiO_2层,加工后碳化硅表面会残留一定厚度且成分为SiO_2的损伤层;当机械去除的速率高于化学反应的速率时,碳化硅表面还来不及形成软质SiO_2层就与磨料接触,导致材料去除率过低. 因此,平衡化学反应速率和机械去除速率能够同时获得较高的表面质量以及材料去除率.

2.1.2 特种能场辅助化学机械抛光技术

化学机械抛光技术能够获得较高的表面质量,但是较低的材料去除率以及对环境的不友好是其亟待解决的难题. 通过添加特种能场的方式能够替代化学试剂对碳化硅表面进行氧化腐蚀,同时降低化学试剂对环境的影响. 如图4所示,电化学机械抛光技术通过阳极氧化的方式提高化学腐蚀速率;等离子体辅助抛光技术通过等离子体对碳化硅表面进行氧化改性;紫外光辅助化学机械抛光技术通过紫外光及催化剂对碳化硅表面进行氧化腐蚀.

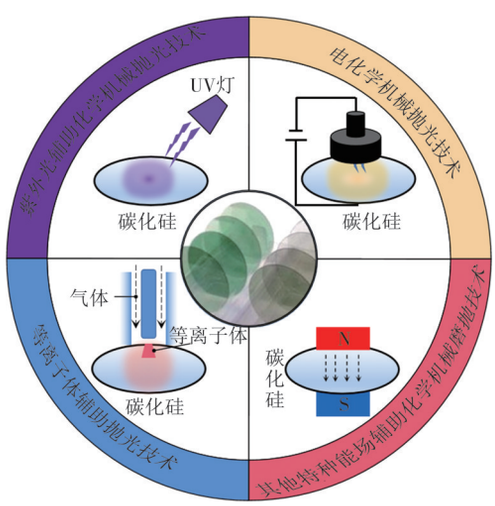


图4 特种能场辅助化学机械抛光技术的原理

Fig.4 Principles of special energy-assisted chemical mechanical polishing techniques

有研究者提出在化学机械抛光中引入电场,即电化学机械抛光技术(Electrochemical Mechanical Polishing, ECMP). 该方法是利用阳极氧化的方式提高化学腐蚀速率,能够有效地提高加工效率,并获得光滑表面. Li等[55]研究了电流密度对电化学机械抛光的影响,他们发现当电流密度超过20 mA/cm^{2}时,阳极氧化和机械去除能够更好地适配,从而提高加工效率. Yang等[77]提出无抛光液的电化学机械抛光,获得了无划痕的碳化硅表面,且表面粗糙度下降至1.352 nm. Chen等[78]对阳极氧化的条件进行了进一步的探究,他们发现当pH=7时,溶液会有更好的氧化效果. Murata等[79]提出一种使用聚氨酯-氧化铈核壳颗粒的无抛光垫的电化学机械加工方法,虽然抛光后表面的划痕没有完全消除,但是材料去除率可达3~4 μm/h. Yang等[80]提出了一种三步无抛光液的电化学机械抛光工艺,可以获得表面粗糙度为0.11 nm的碳化硅表面且材料去除率可以达到

11 μm/h. 电化学机械抛光是一种很有潜力的加工方式,利用绿色电能代替了化学试剂,减少了对环境的污染,同时加工效率也有明显的改善. 由于目前电化学机械抛光都聚焦在小尺寸的碳化硅加工上,随着装备及自动化技术的发展,未来碳化硅的电化学机械抛光将朝着大尺寸、全局平坦化、自动化的方向发展.

Yamamura 等[59]提出了一种利用常压等离子体辐照加工材料的新方法,即等离子体辅助抛光技术(Plasma Assisted Polishing, PAP),其原理是使用等离子体对碳化硅衬底进行辐照,通过羟基自由基来氧化碳化硅衬底表面,形成软质 SiO_2,再通过软磨料机械去除 SiO_2 变质层,等离子体辐射的表面氧化改性和机械去除相互交替进行,从而达到材料去除的目的. Yamamura 等[60]使用氦气等离子体对碳化硅进行辐照,通过纳米压痕试验表明,辐照后碳化硅硬度从 37.4 GPa 降低至 4.5 GPa,然后再使用 CeO_2 软磨料抛光,获得表面粗糙度为 0.1 nm 的超光滑、无划痕的原子级表面. Deng 等[81]使用氦气与水蒸气的等离子体辐照碳化硅衬底,实验证明当氦气中水蒸气浓度在 0.022% 时,等离子体氧化速率为最高,且当抛光速率大于氧化速率时,能够获得阶梯宽度均匀的原子表面阶梯结构. 目前,从等离子体辅助抛光技术的发展来看,高效率、高精度、低能耗、智能化已成为该技术的发展趋势. 另外,开发更先进的在线检测技术也将成为研究热点,以实现对加工量的准确控制,达到精确去除的目的.

研究者们将紫外光催化反应运用到碳化硅的化学机械抛光的过程中,形成了紫外光辅助化学机械抛光技术(Ultraviolet Assisted CMP, UV-CMP). 通过紫外光照射光催化剂产生光催化反应,生成羟基自由基,羟基自由基将碳化硅表面氧化成软质 SiO_2,再通过磨粒划擦去除 SiO_2 变质层. 紫外光催化反应和磨粒划擦去除相互交替进行,能获得超平坦、超光滑、无损伤的原子级表面. Ishikawa 等[82]探究紫外光辅助抛光的可行性,发现在室温下 TiO_2 的光催化作用使得碳化硅表面生成二氧化硅. Tanaka 等人[83]研究在紫外光下使用不同催化剂对碳化硅的抛光影响,结果表明,当催化剂为 TiO_2 时,能够获得无损伤、超光滑的原子级表面,且材料去除率为 0.313 μm/h. Yan 等[84]研究影响紫外光催化反应速率和抛光效果各个因素,发现 H_2O_2 浓度对反应速率的影响最大,光照强度的影响最小,在最佳参数下进行光催化辅助化学机械抛光,最佳的表面粗糙度为 0.423 nm,材料去除率为 0.107 μm/h. 寻找新的催化效率更高的光催化剂将是提高 UV-CMP 材料去除率的重要手段,未来将进一步研究光催化剂以及反应物的最佳摩尔比,以及增强光催化活性的新方法,进而提高磨抛加工的效率.

2.2 以机械诱导为主的反应磨抛技术

以化学腐蚀为主的反应磨抛技术可以获得理想的碳化硅衬底,但是较低的效率以及对环境的不友好都是其亟须解决的问题. 因此研究人员提出在加工过程中通过机械力划擦诱导化学反应,达到兼顾效率以及表面质量的目的.

2.2.1 磨粒划擦诱导碳化硅水反应的反应磨抛技术

Lu 等[85]提出了一种用于超精密加工的绿色、高效、半固结的磨料工具——SG 抛光垫,在仅使用蒸馏水作为冷却液的情况下利用该工具可以获得超光滑、无划痕、几乎无表面损伤的碳化硅衬底表面. 这一技术被称作溶胶凝胶抛光技术,这是一种新型的绿色高效抛光技术,该技术借助软质基体所拥有的柔性特点,实现了磨粒的“容没”效应. “容没”效应是指在抛光加工过程中磨粒接触到加工表面时,由于软质基体的存在,较为突出的磨粒可以产生回弹,进而保证表层磨粒能够近似在同一水平面内对工件进行加工,从而获得均匀的材料去除,以达到更好的抛光效果,是一种非常有潜力的绿色高效抛光技术. Luo 等[86]使用金刚石和氧化铝磨料的半固结和固结抛光垫进行了对比试验,发现固结磨料抛光工具的材料去除尺度不均匀,从几纳米到几百纳米不等,很难保持表面的完整性;而使用半固结抛光垫却能够获得具有亚纳米级的光滑无划痕表面,同时在加工后的表面上发现了纳米级厚度的非晶型 SiO_2.

为了研究非晶 SiO_2 的产生原因,罗求发[87]对碳化硅的磨粒抛光去除机理进行了研究,发现在磨粒与衬底表面的机械摩擦作用下,碳化硅表面生成了非晶 SiO_2. 通过进一步研究发现,该现象本质为磨粒划擦诱导了碳化硅与水发生了化学反应. Cheng 等[88]对碳化硅与水的摩擦化学反应机理进行了深入研究. 发现在纳米尺度中,碳化硅衬底表面在金刚石压头的反复机械作用下被诱导成非晶化的碳化硅,然后非晶化的碳化硅再和水反应生成 SiO_2;控制碳化硅与水反应的主要因素是载荷和接触状态,其次

是速度和温度.这一研究阐述了碳化硅与水反应的条件,对其进行合理的利用,可以使碳化硅衬底的加工效率和表面质量得到显著的提升.

在碳化硅衬底的减薄加工过程中有效地应用碳化硅与水的反应可以合理避免裂纹的产生,进而提高碳化硅衬底的表面质量.同时,利用半固结磨料磨削的方式可以有效地解决加工效率和加工质量不能兼顾的问题.如图5所示,在碳化硅衬底的减薄加工中通过控制磨粒的"容没"效应使得突出高度分别为H_1~H_4的磨粒保持在同一高度H_5上,进而通过磨粒划擦诱导碳化硅表面生成非晶碳化硅,然后非晶碳化硅与水发生反应生成软质SiO_2,再通过磨粒划擦去除SiO_2变质层,可以有效提高加工后碳化硅衬底的表面质量.

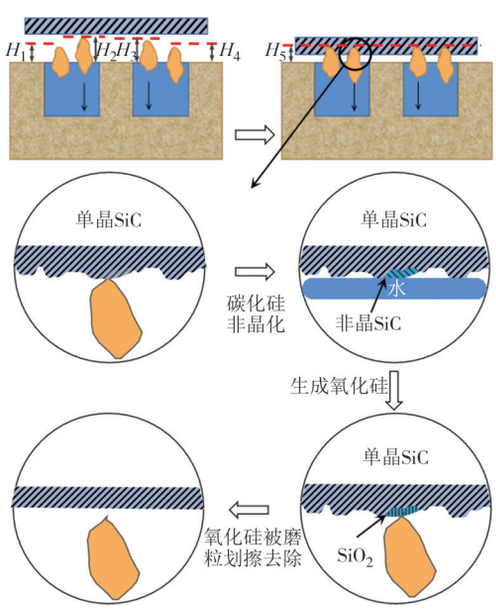


图5 磨粒"容没"效应及碳化硅与水反应原理图

Fig.5 The schematics of the yielding effect of abrasives and the reaction between silicon carbide and water

2.2.2 金属摩擦诱导反应磨削技术

由于碳化硅具有超高的硬度,它经常被当作磨料来加工金属等材料.但是在加工黑色金属时碳化硅却有着异常的表现,它在加工过程中的磨损非常大,这也直接导致了它不适用于加工黑色金属,针对这一问题,研究人员对其磨损原理进行了研究.Komanduri等[89]对碳化硅在钴基高温合金上进行了高速、低进给速度下的模拟磨削磨损试验,发现碳化硅在高温下分解,Si和C原子扩散到金属中形成金属硅化物和不稳定的金属碳化物,在冷却过程中逐渐分解.Duwell等[90]报道碳化硅与铁反应生成铁硅化物.前人的研究表明,纯金属可以与碳化硅在一定条件下发生化学反应,因此将纯金属摩擦化学原理应用于单晶碳化硅的加工在理论上是可行的.

基于此,Wu等[91]研究了纯金属(铁和镍)对单晶碳化硅的高速摩擦去除行为,研究表明碳化硅衬底的C面获得了近乎无损伤的表面、亚表面,而碳化硅衬底的Si面存在裂纹、位错、层错和晶格畸变等晶体缺陷.用铁摩擦碳化硅衬底的C面,其材料去除率可达330 μm/h.用纯镍摩擦碳化硅衬底的Si面,可获得534 μm/h的材料去除率.硅化物以及氧化物的形成表明,碳化硅的C面和Si面去除均以金属摩擦诱导化学作用为主.在反应变质层的不断生成及去除的循环过程中,实现碳化硅的高速去除,纯金属摩擦诱导碳化硅反应的材料去除机理如图6所示.

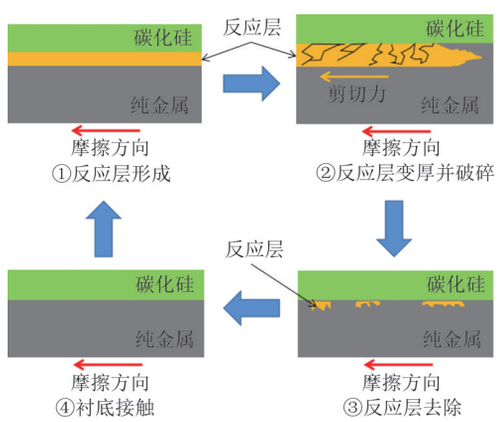


图6 纯金属摩擦诱导碳化硅反应的材料去除机理

Fig.6 Material removal mechanism of pure metal-induced silicon carbide reaction through friction

用金属摩擦诱导反应磨削碳化硅的方法少有人研究,这是一种在碳化硅衬底磨抛和碳化硅芯片减薄加工中具有巨大潜力的高效加工方法.由于目前金属摩擦诱导反应磨削还聚焦在小尺寸的碳化硅加工上,未来将朝着大尺寸、全局平坦化的方向发展,同时提高金属的自锐性以及对加工过程的温度控制也是保证加工表面质量的关键因素.

2.3 小 结

随着各种复杂工况的涌现,对碳化硅衬底的高效率、高精度磨抛技术提出了更为苛刻的要求.化学机械抛光依旧是获得超光滑、无损伤碳化硅衬底的主要手段.虽然各种新型化学磨抛技术都能减轻对环境的破坏,获得良好的表面质量,但受限于加工设备等原因,还无法实现高效磨抛加工.随着自动化、智能化装备及计算机辅助技术和人工智能技术的快速发展和应用,未来有望实现碳化硅衬底的自动化、

智能化超精密抛光加工.

3　典型碳化硅磨抛加工技术的效果对比

已经有大量的研究人员针对碳化硅衬底的磨抛加工技术进行了深入研究,从传统机械磨抛技术、特种能量辅助机械磨抛技术到化学腐蚀反应磨抛技术、机械诱导反应磨抛技术,研究人员通过使用不同的磨粒,添加不同的能场或化学试剂来提高材料去除率和加工质量.对于碳化硅衬底加工的主要手段仍然是传统机械磨抛和化学机械抛光相结合,但其他新型磨抛技术也得到同行的广泛关注.表 1 为不同加工方式的加工效果及优缺点,传统机械磨抛技术的核心去除机理都是磨粒划擦去除,其材料去除率相对较高,但是加工后的表面质量较差,只适用于充当超精密抛光(化学机械抛光)前的一道工序,减少工序余量.纳米磨削的去除机理也是磨粒划擦去除,它的综合加工效果较好,加工后能得到纳米级的表面粗糙度,且材料去除率可达 800 μm/h,目前传统磨抛技术除了纳米磨削的加工设备大部分是进口产品(如日本东京精密、日本冈本和日本迪思科等),在其他技术方面国产设备也具有一定的使用率(如华海清科、特斯迪等).特种能量辅助机械磨抛技术的核心去除机理根据特种能场的不同分为超声振动、激光辐射或放电,它们的材料去除率相对较差,但是加工后的表面质量比传统机械磨抛技术好,添加特种能量辅助机械磨抛后虽然加工效果有所改善,但是对其研究还局限于小尺寸的加工,且加工设备也局限于自制设备,难以满足批量化的稳定生产需求,还需要对大尺寸、超薄化加工进行更深入研究.以化

表 1　不同加工方式的加工效果及优缺点

Tab.1　Processing effects and advantages/disadvantages of different processing methods

磨抛技术	加工方式	去除机理	表面粗糙度 R_a/nm	亚表面损伤	材料去除率/(μm·h^{-1})	优缺点	主流设备来源	参考文献
机械磨抛技术	研磨	磨粒划擦去除	30~50	微米级	2~4	形状、精度和表面质量难以保证	国产、进口	[22-24]
	传统磨削	磨粒划擦去除	100+	微米级	600+	加工效率高,表面质量差	国产、进口	[25]
	纳米磨削	磨粒划擦去除	1~3	亚微米级	800+	砂轮成本高、制作难	进口	[26-27]
	机械抛光	磨粒划擦去除	0.5~2	亚微米级	0.5~1	加工效率低	国产、进口	[28-29]
	超声振动辅助磨削	超声振动+磨粒划擦去除	10~20	微米级	500+	加工质量好,但实际振幅难以保证	自制	[40]
	激光辅助加工	激光辐射+磨粒划擦去除	60+(磨削)0.5~2(抛光)	微米级	0.75~1.5(抛光)	加工成本高	自制	[44,46]
	电火花磨削	放电+磨粒划擦去除	1~3	微米级	由重铸层厚度决定	加工质量好,但加工成本高	自制	[48]
化学反应磨抛技术	化学机械抛光	化学反应+磨粒划擦去除	0.1~0.3	纳米级	0.1~2	加工质量好,成本高,对环境不友好	国产、进口	[72-74]
	电化学机械抛光	阳极氧化+磨粒划擦去除	0.1~0.5	纳米级	3~10	加工质量好,效率高,但聚焦在小尺寸	自制	[75-78]
	等离子体辅助抛光	等离子体氧化+磨粒划擦去除	0.1~0.5	纳米级	0.1~0.5	加工质量好,对环境友好	进口	[58,79]
	紫外光辅助化学抛光	氧化+磨粒划擦去除	0.3~0.5	纳米级	0.1~0.5	加工质量较好	自制	[81-82]
	磨粒划擦诱导水反应磨抛	磨粒划擦+水反应	0.3~0.5	纳米级	0.1~0.5	加工质量好,对环境友好,有良好应用前景	自制	[84]
	金属摩擦诱导反应磨抛	金属划擦	—	几乎无损伤	300~500	加工效率高,但聚焦在小尺寸	自制	[89]

学机械抛光为代表的化学反应磨抛技术是加工碳化硅衬底的重要手段,通过化学试剂或机械诱导的方式对碳化硅衬底表面进行氧化腐蚀,可以有效降低加工难度,获得亚纳米级甚至原子级的表面质量.但是大部分化学反应磨抛技术的加工效率较低,材料去除率只能达到0.5 μm/h左右,金属摩擦诱导反应磨抛的材料去除率可以达到300~500 μm/h,但是其加工后的表面质量还有待提升.目前化学反应磨抛技术中只有化学机械抛光技术有量产化的稳定设备,主要厂家有美国应用材料、日本英格斯以及日本迪思科等国外厂家,以华海清科和特斯迪为首的国内厂家也获得了半导体衬底加工厂的认可.对于除化学机械抛光外的其他化学反应磨抛技术的研究,还只是以小尺寸为主,磨抛加工所使用的自动化、商业化设备也较少,大部分以自制设备为主.

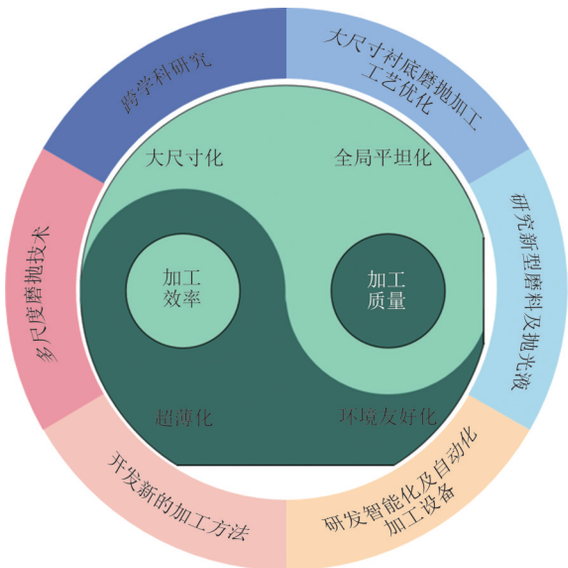


图7 大尺寸碳化硅衬底磨抛技术的发展方向

Fig.7 Development direction of large-sized silicon carbide wafer grinding and polishing technology

4 展 望

由于碳化硅晶体难以长成长条状的晶棒,所以碳化硅晶体主要朝着大尺寸的晶锭方向突破,大尺寸、超薄化的碳化硅衬底磨抛加工将是未来的研究热点,如图7所示,如何兼顾大尺寸碳化硅衬底的加工效率和加工质量将成为关键.目前,主要是通过单面磨削和化学机械抛光的方式实现大尺寸碳化硅衬底的磨抛加工,但是较低的良品率以及加工效率是其亟待解决的难题.通过对现有碳化硅衬底磨抛技术的总结及分析,未来碳化硅衬底磨抛加工技术的发展将集中在工艺参数的优化、新磨料及抛光液的研究、加工设备的自动化和智能化发展、环保加工方法的开发、多尺度磨抛加工以及跨学科研究等方面.

1)大尺寸衬底磨抛加工工艺优化:通过试验以及仿真等手段,探讨大尺寸碳化硅衬底磨抛加工过程中各个参数对加工结果的影响,并对其中的关键参数进行控制以及优化,以期找到最合适的加工参数,实现高效率、高质量、低成本加工.

2)研究新型磨料及抛光液:磨料及抛光液是影响碳化硅衬底加工效率以及加工质量的关键因素.未来,研究人员将致力于研究和寻找新型的磨料以及抛光液,以期实现磨料、抛光液与碳化硅的快速反应,提高加工效率,并降低表面粗糙度.

3)研发智能化及自动化加工设备:借助现代计算机技术和人工智能技术,开发智能化和自动化的加工设备,通过实时数据监测和分析,实现磨抛加工过程中参数的实时控制和优化,提高加工效率和加工质量.

4)开发新的加工方法:碳化硅衬底的磨抛加工过程中会产生大量对环境不友好的废料、废水,探索新的磨抛加工技术,如等离子刻蚀抛光技术、激光磨抛技术等,可以有效减少对环境的影响,同时满足不同场景的应用需求.

5)多尺度磨抛技术:目前碳化硅衬底需经过粗磨、精磨、抛光等一系列加工步骤后才能得到理想的表面质量,烦琐的加工步骤严重影响了加工效率以及加工质量.针对不同尺度的表面缺陷,科研人员将研究多尺度磨抛技术,通过整合多种不同磨抛技术,以实现从粗糙到光洁的磨抛一体化加工过程,减少加工步骤的同时,获得高质量的碳化硅衬底.

6)跨学科研究:碳化硅衬底的磨抛加工技术涉及多个学科领域,如材料科学、化学、力学等.加强各学科之间的交流,促进学科交叉融合,推动碳化硅衬底磨抛技术的创新发展.

5 结 论

本文阐述了碳化硅衬底磨抛技术的研究进展与发展趋势.碳化硅衬底磨抛技术的发展受到高性能器件质量需求的牵引,同时也带动了碳化硅器件性能的提升.由于机械磨抛技术主要依靠硬质磨粒划

擦去除,所以难以获得满足表面质量的碳化硅衬底,因此如何提高机械磨抛技术的加工质量将成为未来的研究热点之一.化学腐蚀和机械诱导反应是化学反应磨抛技术的核心,为了降低碳化硅磨抛加工过程中的时间、经济成本,对化学腐蚀和机械诱导反应的速率提出了更高的要求,同时化学反应速率和机械去除速率的平衡是表面质量的重要影响因素.在未来的研究中,需要优化大尺寸衬底磨抛加工中的工艺参数和磨抛工具;开发新型超精密磨抛技术;研发自动化、智能化的加工设备;实现碳化硅衬底加工的磨抛一体化.

参考文献

[1] DONG Z C, CHENG H B. Study on removal mechanism and removal characters for SiC and fused silica by fixed abrasive diamond pellets[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2014, 85: 1-13.

[2] YIN L, VANCOILLE E Y J, RAMESH K, et al. Surface characterization of 6H-SiC (0001) substrates in indentation and abrasive machining[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2004, 44(6): 607-615.

[3] BEAUCAMP A, SIMON P, CHARLTON P, et al. Brittle-ductile transition in shape adaptive grinding (SAG) of SiC aspheric optics[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2017, 115: 29-37.

[4] ZHANG Q L, TO S, ZHAO Q L, et al. Amorphization and C segregation based surface generation of reaction-bonded SiC/Si composites under micro-grinding[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2015, 95: 78-81.

[5] CASADY J B, JOHNSON R W. Status of silicon carbide (SiC) as a wide-bandgap semiconductor for high-temperature applications: a review[J]. Solid-State Electronics, 1996, 39(10): 1409-1422.

[6] YANG C T, SONG S L, YAN B H, et al. Improving machining performance of wire electrochemical discharge machining by adding SiC abrasive to electrolyte[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2006, 46(15): 2044-2050.

[7] CAO J G, WU Y B, LU D, et al. Material removal behavior in ultrasonic-assisted scratching of SiC ceramics with a single diamond tool[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2014, 79: 49-61.

[8] GAO S, HUANG H, ZHU X L, et al. Surface integrity and removal mechanism of silicon wafers in chemo-mechanical grinding using a newly developed soft abrasive grinding wheel[J]. Materials Science in Semiconductor Processing, 2017, 63: 97-106.

[9] 闫帅, 林彬, 陈经跃. 基于快速面探测方法的碳化硅表面残余应力测量[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2018, 38(6): 80-85.
YAN S, LIN B, CHEN J Y. Surface residual stress measurement of silicon carbide based on fast surface detection method[J]. Diamond & Abrasives Engineering, 2018, 38(6): 80-85. (in Chinese)

[10] AGARWAL S, RAO P V. Experimental investigation of surface/subsurface damage formation and material removal mechanisms in SiC grinding[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2008, 48(6): 698-710.

[11] TAM H Y, CHENG H B, WANG Y W. Removal rate and surface roughness in the lapping and polishing of RB-SiC optical components[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2007, 192/193: 276-280.

[12] ROCCAFORTE F, FIORENZA P, GRECO G, et al. Recent advances on dielectrics technology for SiC and GaN power devices[J]. Applied Surface Science, 2014, 301: 9-18.

[13] ZHOU Y, PAN G S, SHI X L, et al. XPS, UV-vis spectroscopy and AFM studies on removal mechanisms of Si-face SiC wafer chemical mechanical polishing (CMP)[J]. Applied Surface Science, 2014, 316: 643-648.

[14] GAO B, ZHAI W J, ZHAI Q, et al. Novel photoelectrochemically combined mechanical polishing technology for scratch-free 4H-SiC surface by using CeO_2-TiO_2 composite photocatalysts and PS/CeO_2 core/shell abrasives[J]. Applied Surface Science, 2021, 570: 151141.

[15] 黄水泉, 高尚, 黄传真, 等. 脆性材料磨粒加工的纳米尺度去除机理[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2022, 42(3): 257-267.
HUANG S Q, GAO S, HUANG C Z, et al. Nanoscale removal mechanisms in abrasive machining of brittle solids[J]. Diamond & Abrasives Engineering, 2022, 42(3): 257-267. (in Chinese)

[16] LUO Q F, LU J, TIAN Z G, et al. Controllable material removal behavior of 6H-SiC wafer in nanoscale polishing[J]. Applied Surface Science, 2021, 562: 150219.

[17] GAO B, ZHAI W J, ZHAI Q, et al. Novel polystyrene/CeO_2-TiO_2 multicomponent core/shell abrasives for high-efficiency and high-quality photocatalytic-assisted chemical mechanical polishing of reaction-bonded silicon carbide[J]. Applied Surface Science, 2019, 484: 534-541.

[18] ZHANG Y, CHEN H, LIU D Z, et al. High efficient polishing of sliced 4H-SiC (0001) by molten KOH etching[J]. Applied Surface Science, 2020, 525: 146532.

[19] MENG B B, YUAN D D, ZHENG J, et al. Tip-based nanomanufacturing process of single crystal SiC: ductile deformation mechanism and process optimization[J]. Applied Surface Science, 2020, 500: 144039.

[20] WEI S S, YIN Z P, BAI J, et al. The structural and electronic properties of Carbon-related point defects on 4H-SiC (0001) surface[J]. Applied Surface Science, 2022, 582: 152461.

[21] 陈勇彪, 张松辉, 张晓红, 等. 金刚石线锯切割碳化硅陶瓷的机理与工艺研究[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2021, 41(3): 60-67.
CHEN Y B, ZHANG S H, ZHANG X H, et al. Study on mechanism and process of cutting silicon carbide ceramics with

diamond wire saw[J]. Diamond & Abrasives Engineering, 2021, 41(3):60-67.(in Chinese)

[22] CHEN X F, LI J, MA D Y, et al. Fine machining of large-diameter 6H-SiC wafers [J]. Journal of Materials Science & Technology, 2006, 22(5):681-684.

[23] YU Y Q, HU Z W, WANG W S, et al. The double-side lapping of SiC wafers with semifixed abrasives and resin-combined plates [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 108(4):997-1006.

[24] YUAN Z W, CHENG K, HE Y, et al. Investigation on smoothing silicon carbide wafer with a combined method of mechanical lapping and photocatalysis assisted chemical mechanical polishing [C]//Proceedings of ASME 2018 13th International Manufacturing Science and Engineering Conference. Texas: American Society of Mechanical Engineers, 2018.

[25] PAN J S, ZHANG X W, YAN Q S, et al. Experimental study of surface performance of monocrystalline 6H-SiC substrates in plane grinding with a metal-bonded diamond wheel [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 89(1):619-627.

[26] YAMAGUCHI K, TOUGE M, NAKANO T, et al. Study on lapping and constant-pressure grinding of single-crystal SiC [J]. Advanced Materials Research, 2009, 76/77/78:282-287.

[27] VACASSY R, GIBSON A, TITOV A, et al. Surface engineering of SiC through nanogrinding and CMP [J]. Materials Science Forum, 2018, 924:539-542.

[28] LI Z P, ZHANG F H, LUO X C. Subsurface damages beneath fracture pits of reaction-bonded silicon carbide after ultra-precision grinding [J]. Applied Surface Science, 2018, 448: 341-350.

[29] HUO F W, GUO D M, KANG R K, et al. Nanogrinding of SiC wafers with high flatness and low subsurface damage [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2012, 22(12):3027-3033.

[30] YIN L, HUANG H. Surface topography in mechanical polishing of 6H-SiC (0001) substrate [C]//Proc SPIE 6798, Microelectronics: Design, Technology, and Packaging Ⅲ. Canberra: International Society for Optical Engineering, 2007, 6798: 370-379.

[31] CHEN X F, XU X G, LI J, et al. Surface polishing of 6H-SiC substrates[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2007, 23(3): 430-432.

[32] 郝晓丽, 苑泽伟, 温泉, 等. 超声振动辅助研磨单晶碳化硅晶片工艺研究[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2022, 42(3): 268-274.
HAO X L, YUAN Z W, WEN Q, et al. Process research on ultrasonic vibration assisted lapping of single crystal silicon carbide[J]. Diamond & Abrasives Engineering, 2022, 42(3): 268-274.(in Chinese)

[33] SPUR G, HOLL S E. Ultrasonic assisted grinding of ceramics[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1996, 62(4): 287-293.

[34] ZHAO Q L, SUN Z Y, GUO B. Material removal mechanism in ultrasonic vibration assisted polishing of micro cylindrical surface on SiC [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2016, 103:28-39.

[35] ZHOU K, XU J Y, XIAO G J, et al. A novel low-damage and low-abrasive wear processing method of C_f/SiC ceramic matrix composites: laser-induced ablation-assisted grinding[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2022, 302:117503.

[36] LI W N, ZHANG R H, LIU Y S, et al. Effect of different parameters on machining of SiC/SiC composites via pico-second laser[J]. Applied Surface Science, 2016, 364:378-387.

[37] MOLIAN P, PECHOLT B, GUPTA S. Picosecond pulsed laser ablation and micromachining of 4H-SiC wafers [J]. Applied Surface Science, 2009, 255(8):4515-4520.

[38] LUIS C J, PUERTAS I, VILLA G. Material removal rate and electrode wear study on the EDM of silicon carbide[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2005, 164/165:889-896.

[39] LIEW P J, YAN J W, KURIYAGAWA T. Carbon nanofiber assisted micro electro discharge machining of reaction-bonded silicon carbide[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2013, 213(7): 1076-1087.

[40] LIEW P J, YAN J W, KURIYAGAWA T. Fabrication of deep micro-holes in reaction-bonded SiC by ultrasonic cavitation assisted micro-EDM[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2014, 76: 13-20.

[41] 曹建国, 张勤俭. 碳化硅陶瓷超声振动辅助磨削材料去除特性研究[J]. 机械工程学报, 2019, 55(13): 205-211.
CAO J G, ZHANG Q J. Material removal behavior in ultrasonic assisted grinding of SiC ceramics [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(13):205-211.(in Chinese)

[42] LI J, GENG D X, ZHANG D Y, et al. Ultrasonic vibration mill-grinding of single-crystal silicon carbide for pressure sensor diaphragms [J]. Ceramics International, 2018, 44(3): 3107-3112.

[43] WANG J J, FENG P F, ZHANG J F, et al. Experimental study on vibration stability in rotary ultrasonic machining of ceramic matrix composites: cutting force variation at hole entrance [J]. Ceramics International, 2018, 44(12): 14386-14392.

[44] CHEN Y R, SU H H, QIAN N, et al. Ultrasonic vibration-assisted grinding of silicon carbide ceramics based on actual amplitude measurement: grinding force and surface quality [J]. Ceramics International, 2021, 47(11): 15433-15441.

[45] CHEN G P, LI J G, LONG J Y, et al. Surface modulation to enhance chemical mechanical polishing performance of sliced silicon carbide Si-face [J]. Applied Surface Science, 2021, 536: 147963.

[46] LUO X C, LI Z P, CHANG W L, et al. Laser-assisted grinding of reaction-bonded SiC [J]. Journal of Micromanufacturing, 2020, 3(2):93-98.

[47] KIM M, BANG S M, KIM D H, et al. Hybrid CO_2 laser-

polishing process for improving material removal of silicon carbide[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology,2020,106(7): 3139-3151.

[48] ABREGO S P A, KIM M, KIM D R, et al. Spherical mirror and surface patterning on silicon carbide (SiC) by material removal rate enhancement using CO_2 laser assisted polishing [J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2020,21(5):775-785.

[49] THOE T B, ASPINWALL D K, WISE M L H, et al. Polycrystalline diamond edge quality and and surface integrity following electrical discharge grinding[J]. Journal of Materials Processing Technology,1996,56(1/2/3/4):773-785.

[50] YAN J W, TAN T H. Sintered diamond as a hybrid EDM and grinding tool for the micromachining of single-crystal SiC[J]. CIRP Annals,2015,64(1):221-224.

[51] TAN T H, YAN J W. Atomic-scale characterization of subsurface damage and structural changes of single-crystal silicon carbide subjected to electrical discharge machining[J]. Acta Materialia, 2017,123:362-372.

[52] CHEN G M, NI Z F, XU L J, et al. Performance of colloidal silica and ceria based slurries on CMP of Si-face 6H-SiC substrates[J]. Applied Surface Science,2015,359:664-668.

[53] LAGUDU U R K, ISONO S, KRISHNAN S, et al. Role of ionic strength in chemical mechanical polishing of silicon carbide using silica slurries[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects,2014,445:119-127.

[54] 王磊,吴润泽,牛林,等. 碳化硅晶体电化学机械抛光工艺研究[J]. 金刚石与磨料磨具工程,2022,42(4):504-510.
WANG L, WU R Z, NIU L, et al. Study on electrochemical mechanical polishing process of silicon carbide crystal [J]. Diamond & Abrasives Engineering, 2022, 42(4): 504-510. (in Chinese)

[55] LI C H, BHAT I B, WANG R J, et al. Electro-chemical mechanical polishing of silicon carbide[J]. Journal of Electronic Materials,2004,33(5):481-486.

[56] DENG H, HOSOYA K, IMANISHI Y, et al. Electro-chemical mechanical polishing of single-crystal SiC using CeO_2 slurry[J]. Electrochemistry Communications,2015,52:5-8.

[57] YANG X, OHKUBO Y, ENDO K, et al. AFM observation of initial oxidation stage of 4H-SiC (0001) in electrochemical mechanical polishing[J]. Procedia CIRP,2018,68:735-740.

[58] YANG X Z, YANG X, KAWAI K, et al. Dominant factors and their action mechanisms on material removal rate in electrochemical mechanical polishing of 4H-SiC (0001) surface [J]. Applied Surface Science,2021,562:150130.

[59] YAMAMURA K, TAKIGUCHI T, UEDA M, et al. Plasma assisted polishing of single crystal SiC for obtaining atomically flat strain-free surface[J]. CIRP Annals,2011,60(1):571-574.

[60] 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.

[61] DENG H, ENDO K, YAMAMURA K. Damage-free and atomically-flat finishing of single crystal SiC by combination of oxidation and soft abrasive polishing[J]. Procedia CIRP, 2014, 13:203-207.

[62] DENG H, ENDO K, YAMAMURA K. Damage-free finishing of CVD-SiC by a combination of dry plasma etching and plasma-assisted polishing[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2017, 115: 38-46.

[63] ZHOU Y, PAN G S, SHI X L, et al. Effects of ultra-smooth surface atomic step morphology on chemical mechanical polishing (CMP) performances of sapphire and SiC wafers[J]. Tribology International, 2015, 87: 145-150.

[64] YUAN Z W, HE Y, SUN X W, et al. UV-TiO_2 photocatalysis-assisted chemical mechanical polishing 4H-SiC wafer [J]. Materials and Manufacturing Processes, 2018, 33 (11): 1214-1222.

[65] SU J X, DU J X, MA L J, et al. Material removal rate of 6H-SiC crystal substrate CMP using an alumina (Al_2O_3) abrasive [J]. Journal of Semiconductors, 2012, 33(10): 106003.

[66] HEYDEMANN V D, EVERSON W J, GAMBLE R D, et al. Chemi-mechanical polishing of on-axis semi-insulating SiC substrates[J]. Materials Science Forum,2004,457/458/459/460: 805-808.

[67] LEE H S, JEONG H D. Chemical and mechanical balance in polishing of electronic materials for defect-free surfaces [J]. CIRP Annals, 2009, 58(1): 485-490.

[68] ZHOU L, AUDURIER V, PIROUZ P, et al. Chemomechanical polishing of silicon carbide[J]. Journal of the Electrochemical Society, 1997, 144(6): L161-L163.

[69] AIDA H, DOI T, TAKEDA H, et al. Ultraprecision CMP for sapphire, GaN, and SiC for advanced optoelectronics materials[J]. Current Applied Physics, 2012, 12: S41-S46.

[70] NITTA H, ISOBE A, HONG P, et al. Research on reaction method of high removal rate chemical mechanical polishing slurry for 4H-SiC substrate[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2011,50(4R):046501.

[71] PIGNATELLO J J, OLIVEROS E, MACKAY A. Advanced oxidation processes for organic contaminant destruction based on the Fenton reaction and related chemistry[J]. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 2006, 36(1): 1-84.

[72] HARA H, SANO Y, MIMURA H, et al. Novel abrasive-free planarization of 4H-SiC (0001) using catalyst[J]. Journal of Electronic Materials, 2006, 35(8): L11-L14.

[73] KUBOTA A, YOSHIMURA M, FUKUYAMA S, et al. Planarization of C-face 4H-SiC substrate using Fe particles and hydrogen peroxide solution [J]. Precision Engineering, 2012, 36(1):137-140.

[74] LU J B, CHEN R, LIANG H Z, et al. The influence of concentration of hydroxyl radical on the chemical mechanical polishing of SiC wafer based on the Fenton reaction[J]. Precision Engineering,2018,52:221-226.

[75] HARA H, SANO Y, MIMURA H, et al. Damage-free planarization of 4H-SiC (0001) by catalyst-referred etching[J]. Materials Science Forum, 2007, 556/557: 749-751.

[76] 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.

[77] YANG X, YANG X Z, KAWAI K, et al. Highly efficient planarization of sliced 4H-SiC (0001) wafer by slurryless electrochemical mechanical polishing[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2019, 144: 103431.

[78] CHEN Z J, ZHAO Y H. Investigation into electrochemical oxidation behavior of 4H-SiC with varying anodizing conditions [J]. Electrochemistry Communications, 2019, 109: 106608.

[79] MURATA J, YODOGAWA K, BAN K. Polishing-pad-free electrochemical mechanical polishing of single-crystalline SiC surfaces using polyurethane-CeO_2 core-shell particles [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2017, 114: 1-7.

[80] YANG X, YANG X Z, KAWAI K, et al. Novel SiC wafer manufacturing process employing three-step slurryless electrochemical mechanical polishing [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2021, 70: 350-360.

[81] DENG H, MONNA K, TABATA T, et al. Optimization of the plasma oxidation and abrasive polishing processes in plasma-assisted polishing for highly effective planarization of 4H-SiC[J]. CIRP Annals, 2014, 63(1): 529-532.

[82] ISHIKAWA Y, MATSUMOTO Y, NISHIDA Y, et al. Surface treatment of silicon carbide using TiO_2 (IV) photocatalyst [J]. Journal of the American Chemical Society, 2003, 125(21): 6558-6562.

[83] TANAKA T, TAKIZAWA M, HATA A. Verification of the effectiveness of UV-polishing for 4H-SiC wafer using photocatalyst and cathilon[J]. International Journal of Automation Technology, 2018, 12(2): 160-169.

[84] YAN Q S, WANG X, XIONG Q, et al. The influences of technological parameters on the ultraviolet photocatalytic reaction rate and photocatalysis-assisted polishing effect for SiC [J]. Journal of Crystal Growth, 2020, 531: 125379.

[85] LU J, WANG Y G, LUO Q F, et al. Photocatalysis assisting the mechanical polishing of a single-crystal SiC wafer utilizing an anatase TiO_2-coated diamond abrasive [J]. Precision Engineering, 2017, 49: 235-242.

[86] LUO Q F, LU J, XU X P. Study on the processing characteristics of SiC and sapphire substrates polished by semi-fixed and fixed abrasive tools[J]. Tribology International, 2016, 104: 191-203.

[87] 罗求发. LED衬底材料的磨粒抛光去除机理研究[D]. 泉州: 华侨大学, 2018.
LUO Q F. Study on the mechanism of abrasive polishing removal of LED substrate materials[D]. Quanzhou: Huaqiao University, 2018.(in Chinese)

[88] CHENG Z H, LUO Q F, LU J, et al. Understanding the mechanisms of SiC-water reaction during nanoscale scratching without chemical reagents [J]. Micromachines, 2022, 13(6): 930.

[89] KOMANDURI R, SHAW M C. Attritious wear of silicon carbide[J]. Journal of Engineering for Industry, 1976, 98(4): 1125-1134.

[90] DUWELL E J, HONG I S, MCDONALD W J. The role of chemical reactions in the preparation of metal surfaces by abrasion[J]. Wear, 1966, 9(6): 417-424.

[91] WU M, HUANG H, LUO Q F, et al. A novel approach to obtain near damage-free surface/subsurface in machining of single crystal 4H-SiC substrate using pure metal mediated friction[J]. Applied Surface Science, 2022, 588: 152963.