

碳化硅衬底加工过程中的若干问题研究

籍有富¹ 张胜涛^{1,2*} 刘博谦² 赵天宇¹ 张俊杰¹ 李 彬¹

1. 哈尔滨工业大学 黑龙江 哈尔滨 150000

2. 哈尔滨科友半导体产业装备与技术研究院有限公司 黑龙江 哈尔滨 150000

摘 要: 随着新能源汽车、5G通信等行业的迅猛发展,碳化硅(SiC)衬底作为高性能半导体功率器件的关键基础材料备受瞩目。本文聚焦SiC衬底加工过程,深入剖析其切割、研磨、抛光等工序存在的问题。在SiC晶体切割过程中,因SiC硬度极高,导致传统切割效率低、刀具磨损快,而线切割虽精度较高但受切削深度、速度等因素影响;研磨和抛光中,机械磨抛虽适用广但有损伤风险,化学反应磨抛溶液具选择性,特种能量辅助机械磨抛可兼顾效率与质量但技术复杂。同时,表面损伤(SDs)和亚表面损伤(SSDs)对器件性能影响重大,而化学机械抛光(CMP)在去除4H-SiC晶圆衬底SSDs方面应用突出。本文旨在为SiC衬底加工技术的改进与创新提供全面的理论分析与实践参考,助力提升半导体功率器件制造水平。

关键词: 碳化硅;衬底加工;切割;研磨;抛光

1 引言

随着新能源汽车、5G通信、工业自动化等行业的快速发展,对半导体功率器件的性能要求越来越高,由于碳化硅(SiC)具有高击穿电场强度、高导热率、高电子迁移率、化学稳定性好等特点,是制备高性能半导体功率器件的理想材料^[1]。碳化硅(SiC)衬底是制造碳化硅基半导体器件的基础材料,在现代半导体产业中具有重要地位。SiC衬底加工的工序主要有切割、研磨、抛光和清洗等一系列步骤。然后由于SiC的硬度接近于金刚石,这会导致SiC衬底的切割过程变得较为困难,同时,研磨时难以平衡效率与精度,力度不当易造成新的损伤或平整度不佳。抛光时,由于碳化硅化学稳定性高,获得高质量抛光表面困难,且抛光过程易引入杂质污染。这些会导致加工效率低、成本高以及对环境不友好等问题,同时也会直接的影响SiC功率器件的性能,因此本文就SiC衬底加工过程的切割、研磨和抛光进行研究,为SiC衬底加工提供有益参考。

2 加工过程中的切割

碳化硅莫氏硬度高达9.5左右,仅次于金刚石。传统切割方式在面对如此高硬度材料时,切割阻力极大。例如内圆切割,切割刀具在切割碳化硅衬底时,需要克服强大的摩擦力,导致切割速度缓慢。切割过程中,刀具与碳化硅衬底之间的剧烈摩擦会使刀具刃口迅速磨损。以金刚石刀具为例,在切割碳化硅时,由于碳化硅的高

硬度和耐磨性,刀具刃口的金刚石颗粒会逐渐脱落或磨损,降低刀具的切割性能,使得切割效率进一步降低。频繁更换刀具不仅增加了加工成本,还会中断切割过程,严重影响整体切割效率。线切割作为一种高精度的切割方法,其原理是通过多根张紧的钢丝(通常涂覆有金刚石磨料)对碳化硅晶体进行切割。切割时,钢丝在高速运动的同时,将含有磨料的切割液带到切割区域,实现对晶体的研磨切割。这种方法能够同时切割多片衬底,并且切割精度较高,能够有效控制衬底的厚度和表面平整度。Miaocao Wang等人^[2]采用分子动力学方法研究了离轴4H-SiC的纳米切割特性,还研究了切削深度和切削速度的影响。提取并分析了切削力、温度和坐标数。结果表明,当切割方向与c轴的夹角小于90°时,切割引起的堆叠断层在基底面上传播,并向SiC工件深处传播。在滑移面附近会出现键合重建。切削深度也是纳米切割的一个关键参数。切削深度越小,加工越像划痕而非切割。切削深度越大,参与切削的原子越多,切削力和工件温度越高,缺陷也就越多。此外,Goel等人研究了切削工具几何形状对切割过程的影响^[3]。研究表明,负前角会在碳化硅中产生静水应力状态,从而促进韧性到脆性转变。建议使用的前角范围为-25°至-45°、间隙角范围为8°至12°的切削工具。此外,切削速度的影响主要体现在工件温度上。工件温度随切削速度的增加而升高。这可能会进一步影响结构变化和切削力。

3 研磨和抛光

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

论文获得黑龙江省自然科学基金项目支持,项目名称:面向大尺寸超低缺陷导电型碳化硅衬底制备机理研究(项目编号:JQ2024E009)

底最终加工质量优劣的关键工序。研磨又可以分为粗研磨和精研磨，其中粗研磨是通过使用研磨盘和研磨颗粒对切割后的碳化硅衬底进行初步研磨。研磨盘一般采用铸铁或碳化硅等材料，研磨颗粒可以是金刚石、碳化硼等。粗研磨的目的是快速去除切割过程中产生的表面损伤层和较大的粗糙度，使衬底表面达到一定的平整度和光洁度。而精研磨则是采用更细的研磨颗粒和更高精度的研磨设备进行研磨。在精研磨过程中，研磨参数（如研磨压力、研磨盘转速、研磨时间等）需要精确控制，以进一步提高衬底表面的平整度，减小表面粗糙度。精研磨后的衬底表面粗糙度可以达到纳米级别，为后续的抛光工序做好准备。

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、以化学反应为主的化学反应磨抛技术和特种能量辅助机械磨抛技术^[4]。机械磨抛技术可用于各种硬度的材料，无论是金属材料（如钢铁、铝合金），还是非金属材料（如陶瓷、玻璃），都能通过选择合适的磨具和工艺参数进行磨抛处理，且能够实现较高的尺寸精度和形状精度控制。但是其缺点为磨抛过程需要消耗大量时间和能量，过度的机械作用可能会在材料表面产生新的划痕、微裂纹等损伤，影响材料的性能和使用寿命。化学反应磨抛技术对于一些材料，化学反应能够快速溶解表面材料，实现高效的表面平整化，且主要依靠化学反应，机械作用轻微，一般不会对材料表面引入机械损伤。但是所使用化学溶液对材料具有选择性，一种化学抛光液通常只适用于特定类型的材料，通用性较差。相较于前两种而言，特种能量辅助机械磨抛技术可以兼顾质量和加工效率。包含有超声振动辅助磨削技术、激光辅助加工技术、电火花磨削技术等，其原理如图1所示。此外，Aida等人^[5]研究了通过改变金刚石磨料尺寸对GaN表面进行机械抛光的效果。金刚石磨料越大，去除率越快，但表面抛光也越粗糙。

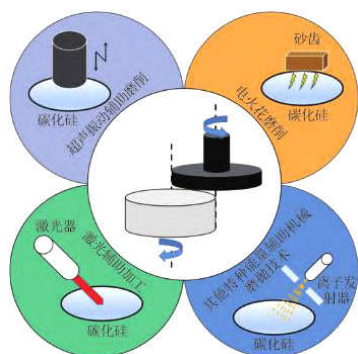


图1^[4] 不同特种能量辅助机械磨抛技术的原理

4 加工过程中产生的损伤

除了晶体在生长过程中产生的缺陷外，对衬底外延和后续器件制造影响最大的缺陷就是表面损伤（surface damages, SDs）和亚表面损伤（subsurface damages, SSDs）^[6]。SDs的产生是由于在晶圆制造过程中，如切割、研磨、抛光等工序，工具与晶圆表面直接接触，如果工具表面不平整或存在硬颗粒，就容易在晶圆表面划出痕迹。例如，切割刀片上附着的杂质颗粒在切割晶圆时，会在表面产生划痕。而SSDs是位于晶圆表面以下一定深度范围内的损伤，通常无法直接通过光学显微镜观察到，需要借助更先进的检测手段，如透射电子显微镜（TEM）、扫描声学显微镜（SAM）等才能发现。SSDs主要包括位错、层错、微裂纹等晶体结构缺陷。例如，在研磨过程中，由于机械应力的作用，晶圆亚表面可能会产生位错，这些位错会影响电子在材料中的传输，进而影响器件的电学性能。有研究表明，通过优化线锯切工艺可显著控制4H-SiC的SDs/SSDs的厚度，其中减小晶体进给速度、增大线速度均有利于减小SDs/SSDs的厚度^[7]。在众多用于去除4H-SiC晶圆衬底亚表面损伤（SSDs）的方法中，超精密加工里的化学机械抛光（CMP）在工业领域应用最为广泛。这是因为CMP技术不仅能够高效地去除线切研磨过程中产生的损伤，还能最大程度地避免引入新的损伤，近乎实现无损加工^[8]。原因在于相比单纯的机械研磨，CMP在去除损伤的同时，由于化学作用的参与，能极大地减少因机械力过大而引入新的表面和亚表面损伤的风险。其温和的作用方式使得在去除材料的过程中，对晶圆衬底的整体结构影响较小，有助于保持晶圆的晶体完整性，从而保障器件的性能和可靠性。尽管CMP能使晶圆表面变得较为光滑平整，然而在经过CMP处理后的晶圆长晶过程中，晶体内部依旧存在大量缺陷。与之形成对比的是，采用氢刻蚀工艺对籽晶进行处理后，SSDs大部分得以消除，生长晶体中的位错密度也显著降低^[9]。但如处理条件不能严格控制会产生台阶聚束等缺陷，因此，有研究学者开始尝试通过高温退火来去除SSDs，在Si气氛退火工艺中可以很好的去除SSDs而且不会引入新的缺陷^[10]。

5 总结

碳化硅衬底加工在半导体产业中极为关键，但面临诸多挑战。切割环节，其高硬度使传统切割法效率低、刀具损耗大，而线切割虽具精度优势但受多种因素制约，需精准把控工艺参数与刀具特性。研磨和抛光工序，机械、化学及特种能量辅助机械磨抛技术各有利弊，在平衡加工效率、精度与表面质量上仍有提升空

间。加工产生的表面和亚表面损伤严重影响器件性能,优化加工工艺和开发高效去除损伤方法至关重要。化学机械抛光在去除亚表面损伤方面虽应用广泛,但整个加工流程仍需持续改进与创新。未来,应深入研究各工序机理,整合先进技术,优化工艺参数,加强过程控制,降低成本,提高加工质量与效率,以满足新能源汽车、5G通信等行业对高性能碳化硅基半导体器件的迫切需求,推动碳化硅衬底加工产业蓬勃发展,助力半导体技术迈向新高度。

参考文献

- [1]麦玉冰,谢欣荣.第三代半导体材料碳化硅(SiC)研究进展[J/OL].广东化工,2021,48(9): 151-152+155.
- [2]WANG M, ZHU F, XU Y, et al. Investigation of nanocutting characteristics of off-axis 4H-SiC substrate by molecular dynamics[J/OL]. Applied Sciences, 2018, 8(12): 2380
- [3]The current understanding on the diamond machining of silicon carbide - IOPscience[EB/OL].
- [4]罗求发,陈杰铭,程志豪,等.碳化硅衬底磨抛加工技术的研究进展与发展趋势[J/OL].湖南大学学报(自然科学版),2024,51(4):140-152.
- [5]AIDA H, TAKEDA H, KIM S W, et al. Evaluation of subsurface damage in GaN substrate induced by mechanical polishing with diamond abrasives[J/OL]. Applied Surface Science, 2014, 292: 531-536.
- [6]李国峰,陈泓谕,杭伟,等.碳化硅晶圆的表面/亚表面损伤研究进展[J/OL].人工晶体学报,2023,52(11):1907-1921. DOI:10.16553/j.cnki.issn1000-985x.20231011.006.
- [7]GAO Y, CHEN Y, GE P, et al. Study on the subsurface microcrack damage depth in electroplated diamond wire saw slicing SiC crystal[J/OL]. Ceramics International, 2018, 44(18): 22927-22934.
- [8]MARTIN C, KERR D T M, STEPKO W, et al. Sub-surface damage removal in fabrication & polishing of silicon carbide[J].
- [9]Study on dislocation behaviors during PVT growth of 4H-SiC | scientific.net[EB/OL].
- [10]Development of “si-vapor etching” and “si vapor ambient anneal” in TaC/ta composite materials | scientific.net[EB/OL].