

碳化硅晶圆的快速高质量复合加工方法

杨超¹, 李福坤¹, 任婷¹, 魏源松¹, 白杨^{2*}

¹ 长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130012;

² 中国科学院长春光学精密与物理研究所, 吉林 长春 130033

摘要 为了提升单晶碳化硅(SiC)材料的抛光效率及表面质量,提出了将传统抛光与磁流变抛光(MRF)相结合的新方法,并对一块直径为 100 mm 的单晶 SiC 晶圆进行实际加工。首先,采用环抛技术将单晶 SiC 晶圆表面粗糙度快速加工至 0.6 nm 左右;然后,通过配制特殊的磁流变抛光液,采用磁流变抛光技术对晶圆进行 35 min 快速均匀抛光,改善了 SiC 晶圆表面的缺陷,消除了晶圆亚表面损伤;最后,采用纳米金刚石抛光液,通过环抛对 SiC 晶圆进行精抛光,获得了粗糙度为 0.327 nm 的高表面质量单晶 SiC 晶圆。该方法将单晶 SiC 晶圆的加工时间缩短了约 7 h,有利于提升 SiC 晶圆的加工效率、精度及质量。

关键词 光学制造; 碳化硅晶圆; 磁流变抛光; 环抛; 表面质量; 亚表面损伤

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.1322001

Fast and High Quality Composite Processing Method for Silicon Carbide Wafers

Yang Chao¹, Li Fukun¹, Ren Ting¹, Wei Yuansong¹, Bai Yang^{2*}

¹ School of Optoelectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130012, China;

² Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China

Abstract In order to improve the polishing efficiency and surface quality of single-crystal silicon carbide (SiC) materials, we propose a new method based on traditional polishing combined with magnetorheological finishing (MRF), which is used for the practical fabrication of a single-crystal SiC wafer with a diameter of 100 mm. First, the surface roughness of the single-crystal SiC wafer is rapidly processed to about 0.6 nm by the ring polishing method. Then, the wafer uniform polishing for 35 min with MRF is adopted to improve the defects on the surface of SiC wafer and eliminate the subsurface damage of the wafer via the preparation of a special magnetorheological polishing fluid. Finally, the ring polishing is adopted to finely polish the SiC wafer with the nano-diamond polishing fluid and a high surface quality single-crystal SiC wafer with roughness of 0.327 nm is obtained. The method proposed here reduces the fabrication time by about 7 h and is helpful to improve the fabrication efficiency, precision and surface quality of SiC wafers.

Key words optical fabrication; silicon carbide wafer; magnetorheological finishing; ring polishing; surface quality; subsurface damage

OCIS codes 220.4610; 160.6000; 120.6000

1 引言

半导体产业的发展与我国国防、军事、航空航天、能源等科技领域的进步息息相关^[1-2]。以单晶碳化硅(SiC)为代表的第三代半导体材料是一种重要

的新型宽禁带半导体材料,可作为生长氮化镓(GaN)、石墨烯的衬底材料。同时,单晶 SiC 材料具有高杨氏模量、高硬度、耐高温、耐腐蚀等特性,可广泛用于制作高温、高频的大功率半导体器件^[3],更是新一代雷达、卫星通讯、通讯基站的核心部件材料,

收稿日期: 2020-02-10; 修回日期: 2020-03-08; 录用日期: 2020-03-30

基金项目: 国家自然科学基金(61905024)

* E-mail: baiyang5406@sina.com

具有相当重要的应用价值和广阔的发展前景。

单晶 SiC 晶圆衬底的平整度、表面粗糙度和亚表面损伤大小是衡量晶圆加工质量的核心指标。因此,研究高精度、高效率、高质量、低成本的单晶 SiC 晶圆超精密加工技术具有极为重要的意义^[4-5]。目前,国内外诸多研究人员开展了单晶碳化硅衬底的超精密加工工艺研究。Su 等^[6]用氧化铝磨粒对直径为 5.08 cm 的 6H-SiC 的 Si 面和 C 面进行化学机械抛光,获得了表面粗糙度优于 1 nm 的 SiC 单晶衬底。Chen 等^[7]利用化学机械抛光(CMP)技术对单晶 SiC 材料开展了抛光实验研究,分析了碱性抛光条件下的抛光效率及表面粗糙度。Yin 等^[8]使用粒径(直径,全文同)为 3 μm 的金刚石微粉对 6H-SiC(001)进行机械抛光,尺寸为 10 μm ×10 μm ,对应的表面粗糙度为 2.5 nm。Deng 等^[9-10]提出等离子体辅助抛光单晶碳化硅的方法,借助大气压下水蒸气等离子体辐射进行表面改性,并使用 CeO_2 磨料进行抛光,获得无损伤且平坦化的碳化硅表面,但抛光前需要对表面进行适当的改性处理。Eryu 等^[11]使用 N 离子注入和化学机械抛光相结合的方法将直径为 5.08 cm 的 SiC 单晶衬底表面的粗糙度方均根(RMS)提升至 0.6 nm。Everson 等^[12]使用 KOH 对 6H-SiC 进行腐蚀处理后,用原子力显微镜测得直径为 5.08 cm 的 SiC 单晶衬底表面粗糙度 R_a 为 0.5 nm。上述研究虽然得到了单晶 SiC 衬底超光滑表面,但加工效率和表面质量仍有待于进一步提升。因此,亟需新的加工策略和方法以提高单晶 SiC 晶圆的加工效率和加工质量。

本文提出将传统环抛工艺与磁流变抛光(MRF)相结合的单晶 SiC 晶圆加工新方法。首先,采用传统环抛对晶圆进行快速加工研磨抛光,获得亚纳米量级的表面粗糙度。然后,采用磁流变抛光对晶圆表面进行均匀抛光,环抛后表面存在的微小深坑得到消除或展宽,实现了对晶圆亚表面损伤(SSD)的快速去除。最后,采用环抛配合纳米金刚石抛光液,对晶圆进行最终的精抛光,并获得了具有高表面质量的超光滑表面。利用本文所提出的方法,实现了单晶 SiC 晶圆的快速、超光滑、无亚表面损伤加工,有利于提高晶圆衬底加工效率和表面质量,进而提升其电学特性。

2 环抛机加工

2.1 环抛机加工过程

为了验证所述工艺的可行性,对一块直径为

100 mm 的单晶 SiC 晶圆进行实际加工。首先,采用封胶将单晶 SiC 晶圆粘结到初始面形峰谷值(PV)优于 100 nm 的熔融石英玻璃基板表面,粘结方式如图 1 所示。然后,采用环抛机对激光切割的晶圆表面进行快速抛光,抛光过程如图 2 所示。

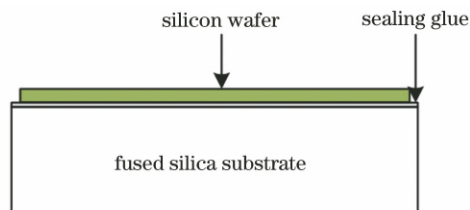


图 1 粘结示意图

Fig. 1 Schematic of bonding

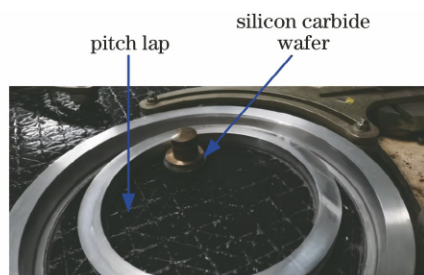


图 2 环抛加工图

Fig. 2 Fabrication by ring polishing

环抛机抛光分为两步,镜面上方的配制块配重均为 3 kg,选取不同粒径的单晶金刚石微粉作为抛光粉,具体加工参数如表 1 所示。

表 1 环抛加工参数及时间

Table 1 Parameters and time of fabrication by ring polishing

Step No.	Particle size of powder / μm	Counter weight / kg	Processing time / h
Step 1	14–28	3	20
Step 2	1.5–3.5	3	18

常规加工策略:首先使用粒径为 14~28 μm 的金刚石微粉快速消除晶圆的切割损伤,然后分别采用粒径为 8~16 μm 、4~8 μm 及 1.5~3.5 μm 的金刚石微粉逐步消除上一道工序残留的表面损伤和亚表面损伤^[13]。本文采用环抛机和粒径为 14~28 μm 单晶金刚石微粉,为了降低加工正压力,减少表面划痕及减小亚表面损伤的深度,采用低配重并结合沥青抛光盘环抛加工 20 h,以消除表面切割损伤。但是,晶圆表面仍然存在表面缺陷及亚表面损伤层,根据中位裂纹深度理论可知,亚表面损伤 SSD 约等于 $P^{2/3}$ (P 为加工正压力),可以估计本道工序造成的 SSD 为 1.0~1.5 μm ^[13-14]。进一步直接采用粒径为 1.5~3.5 μm 的单晶金刚石微粉加工

18 h,消除上一道工序留存的表面缺陷及亚表面损伤。

2.2 环抛机加工结果

利用环抛机对单晶 SiC 晶圆进行 38 h 抛光后,采用 Zygo 公司的 New View 7200 白光干涉仪对加工后表面进行粗糙度检测,测量得到加工表面粗糙度结果如图 3 所示。从图 3 中可以看出,粗糙度 PV 值为 88.193 nm,RMS 为 0.735 nm,表面粗糙度 R_a 为 0.571 nm。虽然环抛机加工后的 SiC 晶圆表面粗糙度达到亚纳米量级,但其表面分布着深度不同的麻点和深坑,产生了较多的高频成分。在传统环抛加工过程中,抛光作用力垂直于工件表面,SiC 晶圆与磨粒之间的机械作用力较大,使得单晶 SiC 晶圆的表层产生麻点、划痕等表面缺陷以及亚表面损伤。根据中位裂纹深度理论分析可知,亚表面损伤 SSD 为 150~200 nm。

若晶圆表面存在的表面缺陷及亚表面损伤无法消除,单晶的电学性能将大打折扣,甚至无法使用。如果继续采用传统加工方法来消除表面缺陷及亚表面损伤,这将意味着需要进一步采用纳米级的抛光粉和更小配重(正压力),从而导致材料去除效率过低($<0.1 \mu\text{m} \cdot \text{h}^{-1}$),若要完全消除亚表面损伤并保证表面粗糙度,需要近 10 h 的分步骤抛光且无法

保证平面度的稳定。因此,传统的加工方法很难解决这一问题。鉴于此,本文提出将传统环抛与磁流变抛光技术相结合的新方法,实现对晶圆表面缺陷及亚表面损伤的快速消除。

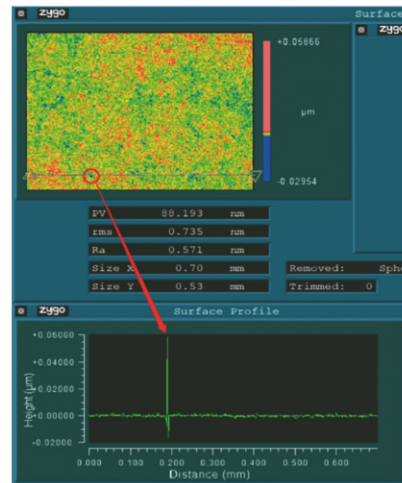


图 3 加工表面典型的粗糙度

Fig. 3 Typical roughness of fabricated surface

3 单晶 SiC 晶圆的磁流变抛光

3.1 磁流变抛光技术原理

磁流变抛光技术的基本工作原理如图 4 所示。

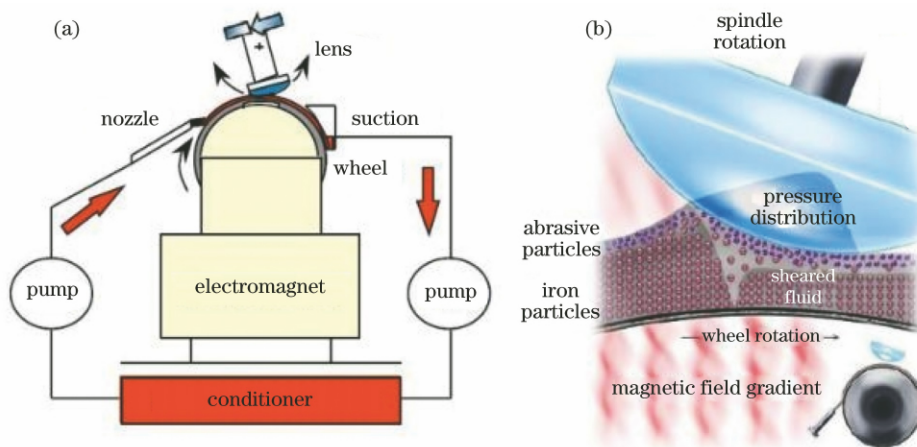


图 4 磁流变抛光原理图。(a) MRF 系统示意图;(b)磁流变抛光液在抛光下的状态

Fig. 4 Principle of MRF. (a) Diagram of MRF system; (b) magnetorheological polishing fluid state under polishing

喷射泵通过喷嘴将储液罐中的磁流变抛光液喷洒在旋转抛光轮上,抛光液在抛光轮的带动下通过工件与抛光盘之间的微小间隙,此处的高梯度磁场(电磁场或是永磁场)使磁流变抛光液从液体状态转变成类固体形态,形成一个柔性抛光磨头,柔性抛光磨头在旋转抛光轮的带动下对工件进行抛光。磁流变抛光液形成的柔性磨头通过磁场作用区域后,又

变为具有流动性的液体,并通过回收泵被回收至储液罐^[15-16]。磁流变抛光技术具有去除效率高、去除函数稳定、抛光表面质量好、不引入亚表面损伤等优点,并且磁流变抛光常作为亚表面损伤检测的方法^[17]。目前磁流变抛光可以实现对多种材料的抛光,包括玻璃、硅(单晶硅、改性镀层)、碳化硅及部分金属材料等^[18-19]。

3.2 去除函数实验

要实现单晶 SiC 的高效磁流变抛光,采用合适的磁流变抛光液是关键,为此研制了适用于单晶 SiC 材料抛光的磁流变抛光液。抛光液的主要成分如表 2 所示。所用铁粉粒径为 $4.5\ \mu\text{m}$,抛光粉为金刚石微粉,粒径为 $0.5\ \mu\text{m}$ 。

表 2 磁流变抛光液主要成分

Table 2 Main components of magnetorheological polishing fluid

Ingredient	Iron powder	Abrasive	Water-based composite carrier liquid
Volume fraction /%	40	0.2	Bal.

表 3 抛光参数

Table 3 Polishing parameters

Parameter	Polishing wheel diameter /mm	Rotating speed /($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	Penetration depth /mm	Temperature / $^{\circ}\text{C}$
Value	160	120	0.9	22

实际去除函数的测试加工图如图 5 所示。



图 5 去除函数测试加工图

Fig. 5 Process chart of removal function test

经过 10 s 的单点驻留抛光,所得去除函数的 Zygo 干涉检测结果如图 6 所示,其中色度条表示去除量,单位是波长 λ (波长 $\lambda = 632.8\ \text{nm}$)。基于检测结果进行计算,得到去除函数的峰值去除效率 (PRR) 达到 $2\ \mu\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$,去除函数的尺寸为 $14.5\ \text{mm} \times 4.8\ \text{mm}$ 。

3.3 单晶 SiC 晶圆的均匀抛光

进一步开展单晶 SiC 晶圆的全口径加工实验。采用上述实验所得到的去除函数,并在原始面形基础上附加 200 nm 的去除量,进行全口径的均匀去除。加工轨迹采用图 7 所示的光栅式轨迹,其中 X、Y 分别表示横、纵向上的尺寸。由于加工的 SiC 晶圆的直径是 100 mm,因此在模拟计算路径规划过程中进行了适当的延拓,延拓后的直径为

采用所研制的磁流变抛光液开展去除函数实验,实验采用的单晶 SiC 晶圆直径为 100 mm,而且其表面经过传统环抛加工,表面精度 PV 小于 150 nm,粗糙度 RMS 小于 1 nm。去除函数实验采用的抛光参数与实际加工时采用的参数一致,去除函数的单点驻留抛光时间为 10 s,具体抛光参数如表 3 所示。

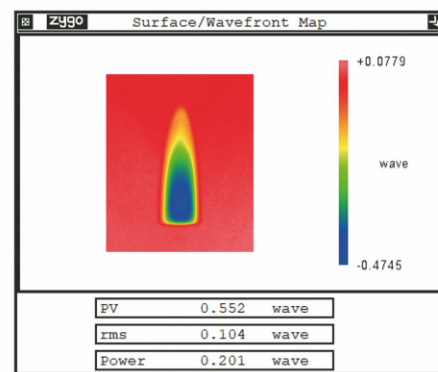


图 6 单晶 SiC 的去除函数

Fig. 6 Removal function of single-crystal SiC

120 mm,这将有利于确保 100 mm 有效直径内晶圆表面材料的均匀去除。

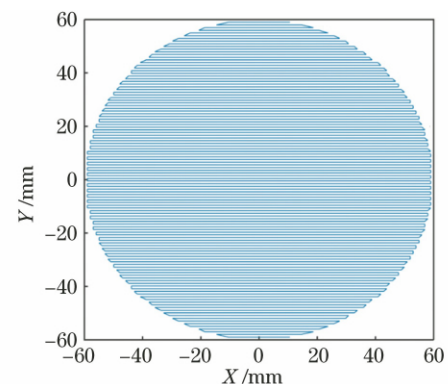


图 7 MRF 加工轨迹

Fig. 7 MRF processing trajectory

基于去除函数及单晶 SiC 附加的均匀面形,通过求解驻留时间矩阵方程^[20],得到总的加工时间为 35 min。经过 35 min 的磁流变均匀抛光,晶圆表面的面形误差分布如图 8 所示。

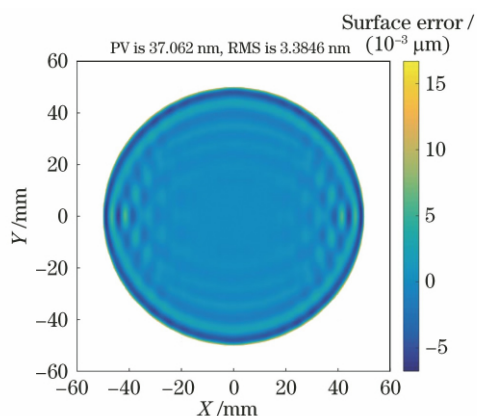


图 8 经过 35 min MRF 后的面形误差分布

Fig. 8 Surface error distribution after MRF for 35 min

与传统的加工方式不同,磁流变抛光过程中磁流变抛光液随抛光轮旋转形成较大的剪切力并作用于工件表面,实现了材料的去除。因此,磁流变抛光作用力是剪切力为主,压力为辅。晶圆表面经过环抛后依然存在表面缺陷和亚表面损伤,采用磁流变抛光后,其结果如图 9 所示。

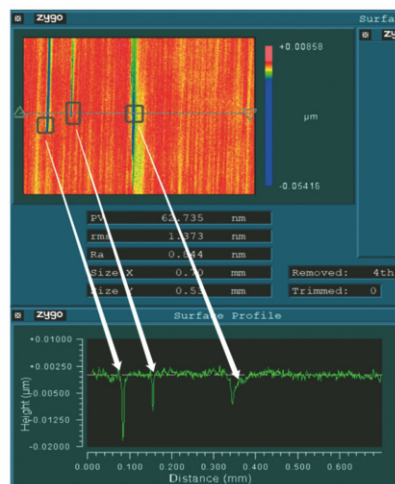


图 9 磁流变抛光后的晶圆表面

Fig. 9 Wafer surface after MRF

从图 9 中可以看出,经过磁流变抛光后,整个表面的粗糙度 R_a 变化较小,且环抛机抛光后留下的表面缺陷平坦化,沿抛光轮旋转方向的划痕深度减小,宽度变大。同时,亚表面损伤也暴露出来。所以,磁流变抛光技术将传统抛光技术不能消除的麻点转化为能加工的凹槽,将难以消除的亚表面损伤暴露出来,达到可消除的目的。上述方法将为后续通过传统的 CMP 或者环抛技术实现晶圆表面高精度平整加工,进而获得高质量的单晶 SiC 晶圆提供了必要的参考。

基于上述磁流变抛光后的单晶 SiC 表面,采用环抛机结合纳米金刚石(中心粒径为 50 nm)抛光液,进

行 2 h 的精抛光,抛光后表面的粗糙度如图 10 所示。磁流变抛光后的表面再经过环抛机精密抛光,其表面的粗糙度 PV 降低至 9.611 nm,此时表面缺陷(凹坑,麻点)已完全消除,表面粗糙度 RMS 降低至 0.41 nm, R_a 降至 0.327 nm。可以看出,将磁流变抛光与传统抛光方法相结合可以实现单晶 SiC 晶圆的超快速高质量加工。不仅缩短了约 7 h 的加工时间,提升了加工效率,还确保了所加工晶圆的加工质量。

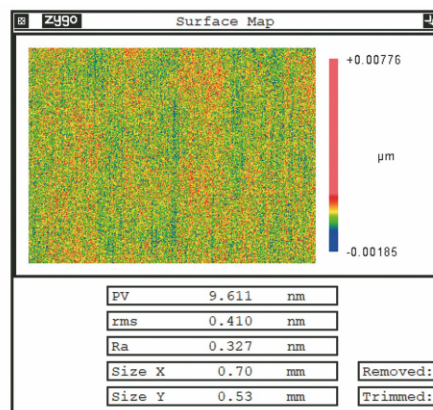


图 10 最终单晶 SiC 晶圆的表面粗糙度

Fig. 10 Final surface roughness of single-crystal SiC wafer

综上所述,针对单晶 SiC 晶圆的加工,本文提出了如下加工策略。首先,晶圆的缺陷和前期减薄需要通过传统抛光方式来完成;然后,采用磁流变抛光对上一步的晶圆进行抛光,并将隐藏的麻点、缺陷及 SSD 暴露出来;最后,采用传统抛光技术实现晶圆的高精度精抛光。采用该策略可以解决传统抛光方式难以解决的亚表面缺陷问题,从而获得性能优良的单晶 SiC 晶圆。

4 结 论

为了解决传统单晶 SiC 晶圆的加工周期长,加工质量难以控制等问题,提出将磁流变抛光和传统抛光技术相结合的新方法。研制了适用于单晶 SiC 抛光的磁流变抛光液,并对环抛加工后的单晶 SiC 晶圆进行实际加工,证明了磁流变抛光技术在保证抛光表面质量的前提下,可以消除或者展宽晶圆表面缺陷(如麻点和凹坑),实现对晶圆亚表面损伤的消除。最后,结合传统的抛光技术,实现了对晶圆的高精度高质量的加工。这一加工方法将加工时间缩短了约 7 h,表面粗糙度 PV 降低至 9.611 nm, RMS 降低至 0.41 nm,有效提升了 SiC 晶圆的加工效率和平整度,消除了晶圆表面缺陷及亚表面损伤,提升了晶圆的使用性能。研究成果将为单晶 SiC 晶圆的高效、高质量加工提供重要参考,对提升半导体晶圆

制造水平具有重要的借鉴意义。

参 考 文 献

- [1] Bai Y X, Liu J Q, Li X, et al. Silicon carbide (SiC) power device and its application prospect in aerospace electronic products[J]. Aerospace Standardization, 2011 (3): 10-12.
白玉新, 刘俊琴, 李雪, 等. 碳化硅(SiC)功率器件及其在航天电子产品中的应用前景展望[J]. 航天标准化, 2011 (3): 10-12.
- [2] Xiao Q, Li Y, Li S J. Situation and development trends of CMP for SiC monocrystal slice [J]. Aerospace Materials & Technology, 2010, 40(1): 9-13.
肖强, 李言, 李淑娟. SiC 单晶片 CMP 超精密加工技术现状与趋势[J]. 宇航材料工艺, 2010, 40(1): 9-13.
- [3] Wu R B, Zhou K, Yue C Y, et al. Recent progress in synthesis, properties and potential applications of SiC nanomaterials [J]. Progress in Materials Science, 2015, 72: 1-60.
- [4] Jiang S Z, Xu X G, Li J, et al. Recent progress in SiC monocrystal growth and wafer machining [J]. Chinese Journal of Semiconductors, 2007, 28 (5): 810-814.
姜守振, 徐现刚, 李娟, 等. SiC 单晶生长及其晶片加工技术的进展[J]. 半导体学报, 2007, 28(5): 810-814.
- [5] Dimitrijević S, Han J, Haasmann D, et al. Power-switching applications beyond silicon: The status and future prospects of SiC and GaN devices[C]//2014 29th International Conference on Microelectronics Proceedings-MIEL 2014, May 12-14, 2014, Belgrade, Serbia. New York: IEEE, 2014: 14398915.
- [6] 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.
- [7] Chen X F, Xu X G, Hu X B, et al. Anisotropy of chemical mechanical polishing in silicon carbide substrates[J]. Materials Science and Engineering: B, 2007, 142(1): 28-30.
- [8] Yin L, Huang H. Surface topography in mechanical polishing of 6H-SiC (0001) substrate[J]. Proceedings of SPIE, 2007, 6798: 67981L.
- [9] Deng H, Yamamura K. Atomic-scale flattening mechanism of 4H-SiC (0001) in plasma assisted polishing[J]. CIRP Annals, 2013, 62(1): 575-578.
- [10] 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.
- [11] Eryu O, Abe K, Takemoto N. Nanostructure formation of SiC using ion implantation and CMP[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 2006, 242(1/2): 237-239.
- [12] Everson W J, Snyder D, Heydemann V D. Polishing and surface characterization of SiC substrates [J]. Materials Science Forum, 2000, 338/339/340/341/342: 837-840.
- [13] Wang D, Zhang Y X, Gao W, et al. Study on the subsurface damage depth of the lapped SiC wafers[J]. Journal of Synthetic Crystals, 2014, 43 (6): 1500-1503, 1508.
王栋, 张银霞, 郜伟, 等. SiC 晶片研磨加工亚表面损伤深度的研究[J]. 人工晶体学报, 2014, 43(6): 1500-1503, 1508.
- [14] Gu Y, Zhu W H, Lin J Q, et al. Study on subsurface damage in the silicon carbide polishing process[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2018 (5): 125-131.
谷岩, 朱文慧, 林洁琼, 等. 碳化硅研抛加工过程中亚表面损伤的研究[J]. 制造技术与机床, 2018(5): 125-131.
- [15] Bai Y, Zhang F, Li L X, et al. Manufacture of silicon modification layer on silicon carbide surface by magnetorheological finishing[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(3): 0322007.
白杨, 张峰, 李龙响, 等. 碳化硅基底改性硅表面的磁流变抛光[J]. 光学学报, 2015, 35(3): 0322007.
- [16] Salzman S, Romanofsky H J, Giannechini L J, et al. Magnetorheological finishing of chemical-vapor deposited zinc sulfide via chemically and mechanically modified fluids [J]. Applied Optics, 2016, 55 (6): 1481-1489.
- [17] Jacob S D. MRF with adjustable pH[J]. Proceedings of SPIE, 2011, 8169: 816902.
- [18] Bai Y, Zhang Z Y, Xue D L, et al. Ultra-precision fabrication of a nickel-phosphorus layer on aluminum substrate by SPDT and MRF [J]. Applied Optics, 2018, 57(34): F62-F67.
- [19] Bai Y, Li L X, Xue D L, et al. Rapid fabrication of a silicon modification layer on silicon carbide substrate [J]. Applied Optics, 2016, 55(22): 5814-5820.
- [20] Li L X, Xue D L, Deng W J, et al. Positive dwell time algorithm with minimum equal extra material removal in deterministic optical surfacing technology [J]. Applied Optics, 2017, 56(32): 9098-9104.