

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.202001002



蓝宝石衬底铜抛-CMP 加工技术

杨磊, 陆静, 张大语

(华侨大学 制造工程研究院, 福建 厦门 361021)

摘要: 针对蓝宝石衬底超精密加工存在的抛光表面不稳定问题,对蓝宝石衬底铜抛-化学机械抛光(CMP)加工技术进行研究,系统探讨铜抛与 CMP 的抛光压力、转速和抛光时间对蓝宝石衬底表面质量及加工效率的影响.综合评价各表面质量指标,结果表明:在满足表面质量对抛光工艺要求的前提下,采用铜抛的最佳工艺参数为铜抛压力 98.0 kPa,转速 $55 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$,铜抛时间 30 min;化学机械抛光的最佳工艺参数为抛光压力 215.6 kPa,转速 $60 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$,抛光时间 120 min,由此可获得高质量、无损伤的蓝宝石衬底抛光表面.

关键词: 蓝宝石衬底; 化学机械抛光; 表面质量; 工艺优化

中图分类号: TH 162 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-5013(2020)06-0701-06

Copper Surface Polishing and CMP Processing Technology of Sapphire Substrate

YANG Lei, LU Jing, ZHANG Dayu

(Institute of Manufacturing Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

Abstract: Aiming at the problem of instability about the polishing surface quality in ultra-precision machining of sapphire substrate, the research on copper surface polishing and chemical mechanical polishing (CMP) processing technology of sapphire substrate was carried out. The effects of copper polishing and CMP polishing pressure, rotation speed and polishing time on the surface quality and processing efficiency of sapphire substrates were systematically discussed. Comprehensive evaluation of various surface quality indicators indicated that, under the premise of meeting the requirements of surface quality for polishing process, the optimized processing parameters of copper surface polishing are as follows: the pressure is 98.0 kPa, the speed is $55 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ and the polishing time is 30 min; the optimized process conditions of CMP are as follows: the pressure is 215.6 kPa, the speed is $60 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ and the polishing time is 120 min. A high quality and non-destructive sapphire substrate polishing surface could be obtained.

Keywords: sapphire substrate; chemical mechanical polishing; surface quality; process optimization

单晶蓝宝石作为 GaN 基发光二极管(LED)应用最广泛的衬底材料,晶片的表面质量直接决定外延的质量,进而影响最终 LED 产品的发光性能及寿命,这就要求蓝宝石衬底加工表面具有很高的完整性,即低表面粗糙度、无划痕、无位错、低非晶相变和亚表面损伤.要获得超光滑的蓝宝石表面,抛光这一道工序必不可少^[1-2].因此,对蓝宝石衬底的抛光技术进行深入研究,具有重要的现实意义.

收稿日期: 2020-01-01

通信作者: 陆静(1981-),女,教授,博士,博士生导师,主要从事半导体基片的超精密加工及超细磨料表面改性的研究. E-mail:16342740@qq.com.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51475175);福建省科技计划项目(2018I0012);福建省厦门市科技计划项目(3502Z20173049);华侨大学研究生科研创新能力培育计划资助项目(18014080030)

在机械作用的机理模型研究方面,摩擦学领域把两个实体相接触的接触面,包括相对滑动和流体润滑的接触情形分为完全直接接触形式、半直接接触形式和非直接接触形式(即流体动力润滑接触)^[3]. 工件两接触面之间的载荷全部由两接触面的固体结构承受即完全直接接触形式;工件表面固体部分接触,并且两表面之间的液体也承受部分载荷为半直接接触形式;工件两表面之间载荷全由流体薄膜层承受即非直接接触形式,也称作流体动力润滑接触形式.

在蓝宝石超精密加工研究方面,国内外学者已经做了一些研究. 一些学者研究磨料的种类对蓝宝石抛光效果的影响^[4-5],从而提高磨料的机械硬度^[6],加强磨料的固相反应能力^[7-8]. 对于蓝宝石衬底化学机械抛光(CMP)抛光液的研究方面,Zhu 等^[9-10]对比了单晶金刚石,多晶金刚石, α -Al₂O₃, γ -Al₂O₃, ZrO₂, CeO₂, SiO₂ 等磨料 CMP 加工蓝宝石衬底的效果,得出 α -Al₂O₃ 对蓝宝石衬底的 CMP 效果最佳. 赵欣等^[11]研究自主研制的抛光液的 pH 值对 c 面蓝宝石衬底化学机械抛光去除速率和表面粗糙度的影响,得出去除速率随 pH 值的增加先升高后减小,表面粗糙度随 pH 值的升高先减小后增加. 周海等^[12]研究不同抛光垫材质对蓝宝石化学机械抛光表面质量的影响,得出聚氨酯型抛光垫比无纺布型加工表面质量更好,并且抛光寿命更长. Xu 等^[13]通过比较蓝宝石超声弯曲振动(UFV)-CMP 与传统 CMP 的加工效果,得出 UFV-CMP 的材料去除率比传统 CMP 大两倍,并且获得了更低的表面粗糙度. 余青等^[14]设计单晶蓝宝石衬底化学机械抛光的合理方案,探究主要抛光工艺参数对抛光衬底的表面质量和材料去除率的影响. Evans 等^[15]详细阐述了研抛过程中工件、研抛盘、磨粒、研抛液之间的相互作用. 周艳等^[16]观察蓝宝石从研磨片抛光后的表面变化,阐述蓝宝石表面原子台阶形貌的形成原因,提出蓝宝石原子级超光滑表面形成的 CMP 去除机理. 本文通过分析蓝宝石的弯曲度、翘曲度、平整度、表面粗糙度和表面缺陷对抛光工艺条件的要求,选定合适的工艺参数进行铜抛和 CMP 试验,综合分析蓝宝石抛光的加工效果,确定适合蓝宝石抛光的最佳工艺参数.

1 实验条件

在已有数据的基础上,得出蓝宝石衬底各表面质量对抛光工艺的要求,如表 1 所示. 表 1 中:TTV 为总厚度偏差;LTV 为局部厚度偏差;TIR 为总平整度;Bow 为弯曲度;Warp 为翘曲度; R_a 为粗糙度; p 为施加的压力; v 为抛光盘的转速;MRA 为材料去除量.

表 1 表面质量对抛光工艺的要求
Tab. 1 Surface quality requirements for polishing process

表面质量参数	铜抛工艺	CMP 工艺
Bow, Warp	$p \leq 122.5 \text{ kPa}$, $v \geq 50 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$, MRA > 25 μm , 马鞍状且正 Bow 面抛光	MRA > 1.5 μm
TTV, LTV, TIR	$p \leq 98.0 \text{ kPa}$, $v \leq 55 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$	有蜡贴片, 平边朝向由晶片状态决定
R_a	—	$p \leq 215.6 \text{ kPa}$, $v \leq 60 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$, MRA > 3.4 μm

蓝宝石材料去除量与其材料去除速率有关,去除速率随压力和转速的增大而增大,当时间一定时,去除量也相应地增大. 可根据 Preston 方程表示材料去除速率和工艺参数的关系,其表达式为

$$R_{MR} = K \cdot p \cdot v.$$
 (1)

式(1)中: R_{MR} 为蓝宝石材料去除速率; K 为 Preston 方程系数.

基于物理学、化学、分子学等多种理论,蓝宝石衬底的材料去除速率公式^[17]可表示为

$$R_{MR} = \frac{\pi d_m v d A_r}{6 \left(\frac{1}{\beta} + \frac{1}{r} - 1 \right)} \left(\frac{6x}{\pi D^3} \right)^{\frac{2}{3}}.$$
 (2)

式(2)中: d_m 为蓝宝石表面分子的平均直径; d 为磨料与蓝宝石接触的平均直径; A_r 为抛光垫与蓝宝石的实际接触面积; β 为表面分子发生化学反应的概率; r 为磨料去除反应产物的概率; x 为磨料的体积密度; D 为磨料的平均直径.

采用 10.16 cm C 向蓝宝石经过退火处理的研磨片,实验前使用 Tropel 平坦度仪测量晶片的厚度、

总厚度偏差、局部厚度偏差、总平整度、弯曲度和翘曲度. 使用数显千分表对晶片的厚度进行分档, 确保厚度的一致性, 然后, 使用固态上蜡机将晶片平边一致朝外均匀贴在氧化铝陶瓷盘上, 每个陶瓷盘贴 7 片, 上蜡贴片平边朝外. 上蜡贴片示意图, 如图 1 所示.

使用 36GPAW 型单面抛光机进行铜抛实验, 实验前, 先使用金刚石车刀对树脂铜盘盘面和沟槽进行修整. 铜抛采用平均粒径为 $3\text{ }\mu\text{m}$ 的金刚石研磨液, 研磨液使用前先进行超声分散 5 min, 并且在铜抛加工过程中使用磁力搅拌器对研磨液持续搅拌. 铜抛完成后, 用水将晶片及陶瓷盘的残留研磨液冲洗干净后, 放置在加热板进行熔蜡卸片; 然后, 使用去蜡剂在六槽清洗机进行清洗; 最后, 在烘干机里进行干燥. 蓝宝石衬底铜抛工艺优化参数, 如表 2 所示.

使用 36GPAW 型单面抛光机进行抛光实验, 抛光前先对抛光垫进行刷洗和修整. 采用平均粒径 110 nm 的 E 型 SiO_2 碱性抛光液和无纺布 S 型抛光垫. CMP 结束后, 使用六槽清洗机对晶片进行清洗后烘干, 目的是清洗残留在晶片表面的抛光液, 减小 Tropel 测量误差. 使用元科 VMX-2200XG 型仪器目视检验晶片表面的划痕、崩角、小坑、橘皮等缺陷. 蓝宝石化学机械抛光工艺优化参数, 如表 3 所示.

表 2 蓝宝石衬底铜抛工艺优化参数

Tab. 2 Optimization parameters of copper casting process for sapphire substrate

实验组	p/kPa	$v/r \cdot \text{min}^{-1}$	t/min
第 1 组	73.5	50	30
第 2 组	73.5	55	30
第 3 组	98.0	50	30
第 4 组	98.0	55	30

表 3 蓝宝石化学机械抛光工艺优化参数

Tab. 3 Optimization parameters for chemical mechanical polishing of sapphire

实验组	p/kPa	$v/r \cdot \text{min}^{-1}$	t/min
第 1 组	196.0	55	120
第 2 组	196.0	60	120
第 3 组	215.6	55	120
第 4 组	215.6	60	120

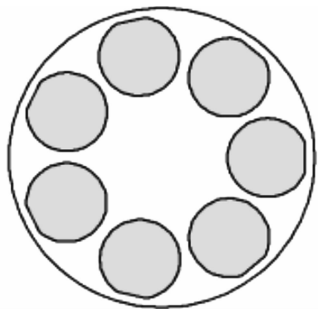


图 1 上蜡贴片示意图
Fig. 1 Waxing and pasting

2 实验结果及分析

2.1 铜抛的工艺参数优化实验结果分析

2.1.1 材料去除量 不同工艺参数下, 铜抛的材料去除量, 如图 2 所示. 由图 2 可知: 在相同的铜抛时间 30 min 下, 第 4 组实验的材料去除量最大, 达到 $28.79\text{ }\mu\text{m}$, 且第 3、4 组的材料去除量均大于 $25\text{ }\mu\text{m}$, 符合铜抛的加工要求.

2.1.2 平整度 不同工艺参数下铜抛的平整度, 如图 3 所示. 由图 3 可知: 抛光前, 表面质量相近的 4 组实验片进行不同铜抛压力和转速加工, 4 组实验均能有效降低晶片的 TTV, LTV, TIR 值. 综合比较 TTV, TIR, LTV 可知: 第 4 组的工艺参数在铜抛前、后的平整度变化值最大, 对晶片平整度控制性最好. 铜抛加工为机械加工, 通过粒径 $3\text{ }\mu\text{m}$ 的金刚石研磨液对晶片进行塑性和脆性材料去除, 而机械

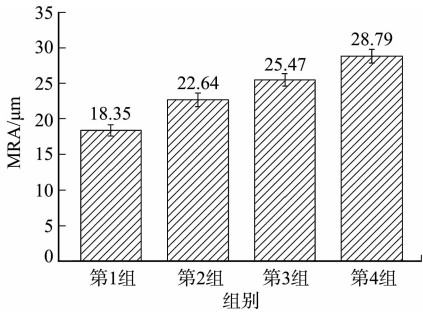
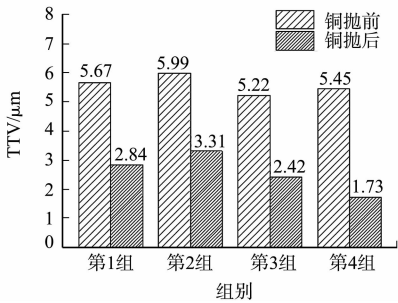
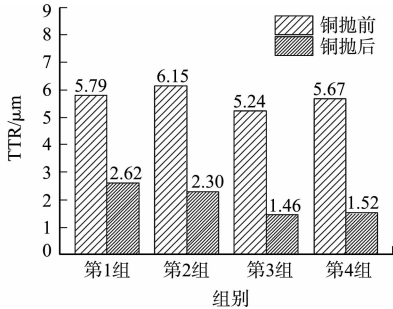


图 2 不同工艺参数下铜抛的材料去除量
Fig. 2 Material removal amount of copper casting under different technological parameters



(a) TTV



(b) TIR

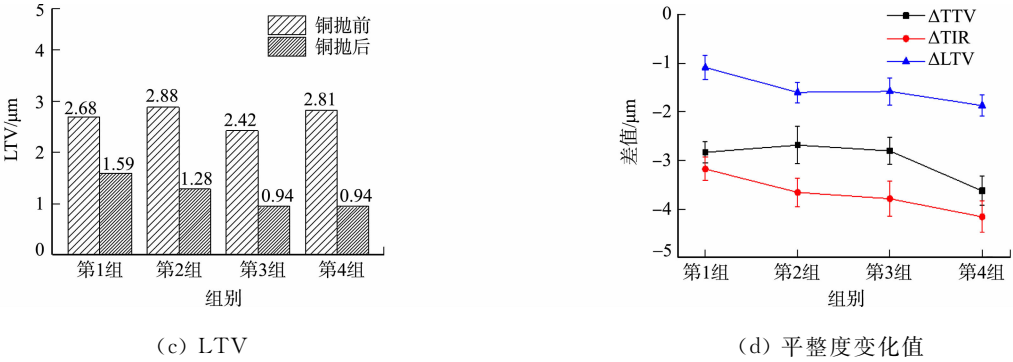


图 3 不同工艺参数下铜抛的平整度

Fig. 3 Flatness of copper casting under different technological parameters

加工过程中产生的热量使铜盘升温并发生变形,且磨粒运动轨迹的差异性必然导致晶片材料的去除不均匀.原因是树脂铜盘的盘面形状易受温度的影响,增大压力和转速,虽然均能提高材料去除率,但产生的热量也使铜盘的变形量增大,使蓝宝石材料去除变得更不均匀,因而降低了其对晶片平整度的修复性.因此,在有效控制晶片的 TTV,TIR 和 LTV 的情况下,增大压力和转速能提高材料的去除率和晶片的平整度.

2.1.3 翘曲度和弯曲度 铜抛虽然去除了研磨的正面损伤层,但由于加工过程产生了应力,晶片发生了较大的变形,呈鼓形状.不同工艺参数下铜抛的翘曲度、弯曲度及其变化值,如图 4 所示.由图 4 可知:铜抛后,4 组实验的 Warp 均变大,其中,第 2,4 组的 Warp 值增幅较第 1,3 组小,Bow 值变化的幅度也较小,但总体而言,4 组实验参数对 Bow 和 Warp 的影响程度相差不大.因此,4 组实验参数均可作为最佳工艺参数.

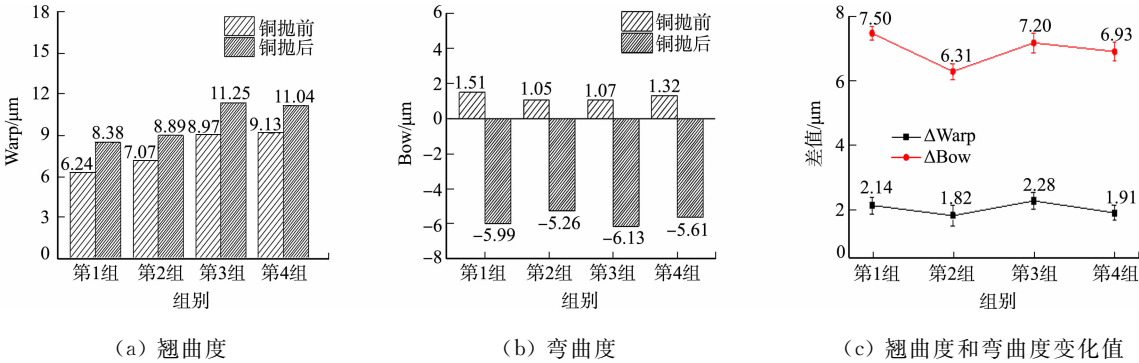


图 4 不同工艺参数下铜抛的翘曲度和弯曲度及其变化值

Fig. 4 Different craft parameters of warpage and curvature under copper surface polishing

2.2 化学机械抛光的工艺参数优化

不同 CMP 工艺参数的材料去除量,如图 5 所示.不同工艺参数下 CMP 的表面粗糙度,如图 6 所示.由图 5 可知:在相同的 CMP 时间 120 min 内,第 4 组实验的材料去除量最大,达到 8.78 μm ,4 组数

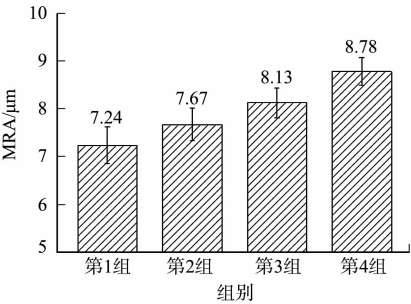


图 5 不同 CMP 工艺参数的材料去除量

Fig. 5 Sapphire material removal amount with different CMP process parameters

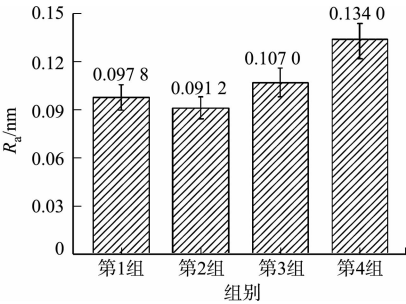


图 6 不同工艺参数下 CMP 的表面粗糙度

Fig. 6 Surface roughness of CMP under different process parameters

据均符合加工要求. 由图 6 可知: 在相同时间内, 4 组实验参数 CMP 后的蓝宝石衬底表面粗糙度均小于 0.2 nm, 符合加工要求, 但第 4 组实验的表面粗糙度略大于其余 3 组的表面粗糙度.

不同工艺参数下 CMP 的平整度, 如图 7 所示. 由图 7 可知: 在相同的抛光时间 120 min 内, 4 组实验均能有效降低晶片的 TTV, TIR, LTV 值. 综合比较抛光前、后 TTV, TIR, LTV 的差值可知, 第 4 组实验的 CMP 工艺参数对晶片的平整度控制性最好.

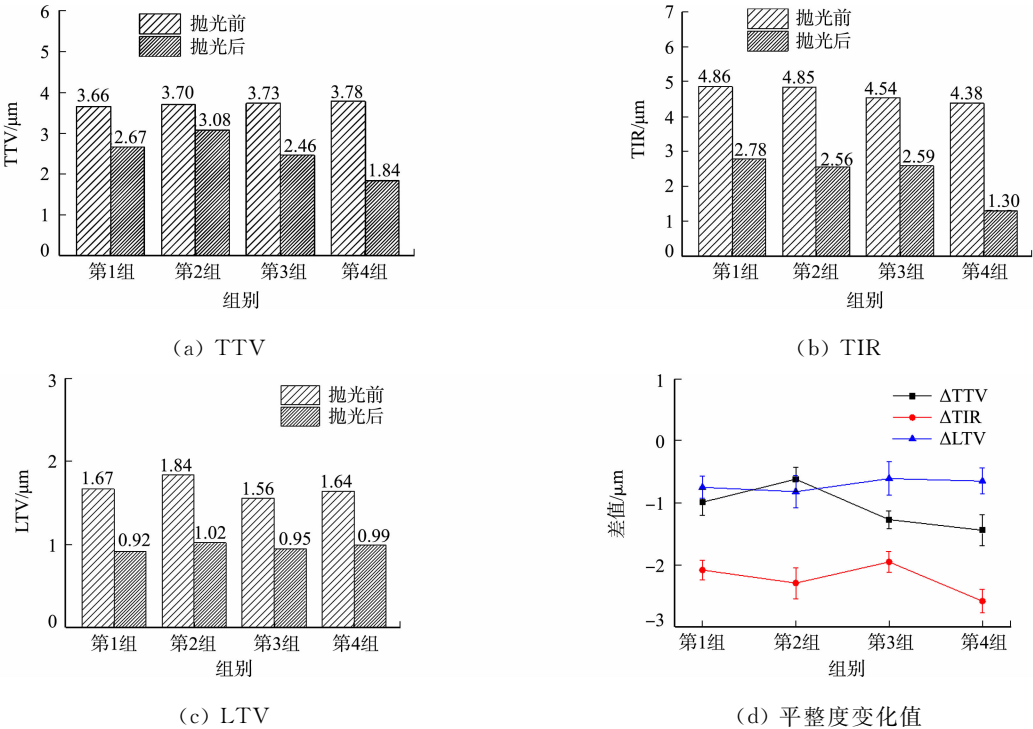


图 7 不同工艺参数下 CMP 的平整度

Fig. 7 Flatness of CMP under different process parameters

不同工艺参数 CMP 的表面粗糙度形貌图, 如图 8 所示. 图 8 中: h 为样品的测量宽度, 选取 $h=5\text{ }\mu\text{m}$. 由图 8 可知: 4 组实验片表面都存在划痕, 划痕深度在 0.1 nm 以内. 在蓝宝石衬底的 CMP 中, 可通过同时控制压力和转速来降低表面粗糙度, 但工艺调整只是其中一部分, 因为晶片的表面粗糙度与抛光

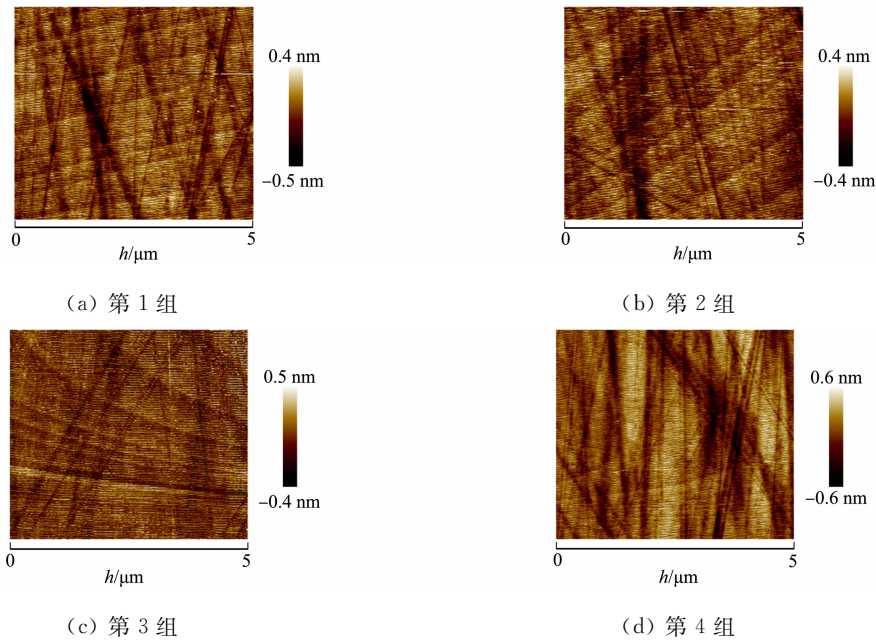


图 8 不同工艺参数 CMP 的表面粗糙度形貌图

Fig. 8 Surface roughness topography of CMP with different process parameters

液和抛光垫存在着较大的关系.

3 结 论

探讨铜抛与 CMP 的抛光压力、转速和抛光时间等工艺参数对蓝宝石衬底表面质量及加工效率的影响. 根据已有实验结果,在满足表面质量对抛光工艺要求的前提下,得到以下最佳工艺参数:

- 1) 铜抛最佳工艺参数为加工压力 98.0 kPa,转速 55 r · min⁻¹,铜抛时间 30 min;
- 2) CMP 的最佳工艺参数为加工压力 215.6 kPa,转速 60 r · min⁻¹,抛光时间 120 min.

参考文献:

[1] 张瑜. 蓝宝石高效低损伤加工工艺研究[D]. 大连:大连理工大学,2015.

[2] 周兆忠,文东辉,张克华,等. 磨粒粒径对蓝宝石研磨均匀性影响的试验研究[J]. 中国机械工程,2008,19(21):2549-2552. DOI:10.3321/j.issn.1004-132X.2008.21.008.

[3] 冯培连. 圆平动化学机械抛光的流体动力性能及材料去除率研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2007.

[4] 汪海波,杨金,鲁世斌,等. 磨料混合对蓝宝石抛光效果的影响[J]. 润滑与密封,2018,43(6):43-48,54. DOI:10.3969/j.issn.0254-0150.2018.06.008.

[5] 张丽萍,苗如林,沈正皓,等. 不同粒径磨料对蓝宝石晶片及其抛光过程的影响[J]. 硅酸盐学报,2018,46(1):59-63. DOI:10.14062/j.issn.0454-5648.2018.01.08.

[6] WANG Xin,LEI Hong,CHEN Ruling. CMP behavior of alumina/metatitanic acid core-shell abrasives on sapphire substrates[J]. Precision Engineering,2017,50:263-268. DOI:10.1016/j.precisioneng.2017.05.013.

[7] LIU Tingting,LEI Hong. Nd³⁺-doped colloidal SiO₂ composite abrasives: Synthesis and the effects on chemical mechanical polishing (CMP) performances of sapphire wafers[J]. Applied Surface Science,2017,413:16-26. DOI:10.1016/j.apsusc.2017.03.270.

[8] HONG Lei,HUANG Liqin,GU Qian. Synthesis of Zn-doped colloidal SiO₂ abrasives and their applications in sapphire chemical mechanical polishing slurry[J]. Journal of Materials Science: Materials in Electronics,2017,28(2):1229-1237. DOI:10.1007/s10854-016-5650-7.

[9] ZHU Honglin,TESSAROTO L A,SABIA R,*et al.* Chemical mechanical polishing (CMP) anisotropy in sapphire[J]. Applied Surface Science,2004,236(1/2/3/4):120-130. DOI:10.1016/j.apsusc.2004.04.027.

[10] ZHU Honglin,NIESZ D E,GREEMJIT V A,*et al.* The effect of abrasive hardness on the chemical-assisted polishing of (0001) plane sapphire[J]. Journal of Materials Research,2005,20(2):504-520. DOI:10.1557/JMR.2005.0072.

[11] 赵欣,牛新环,王建超,等. 不同抛光参数对蓝宝石衬底 CMP 质量的影响[J]. 微电子学,2018,48(2):274-279. DOI:10.13911/j.cnki.1004-3365.170299.

[12] 周海,王黛萍,王兵,等. 抛光垫在蓝宝石衬底化学机械抛光中的应用研究[J]. 机械设计与制造,2009(8):88-90. DOI:10.3969/j.issn.1001-3997.2009.08.035.

[13] XU Wenhui,LU Xinchun,PAN Guoshun,*et al.* Ultrasonic flexural vibration assisted chemical mechanical polishing for sapphire substrate[J]. Applied Surface Science,2010,256(12):3936-3940. DOI:10.1016/j.apsusc.2010.01.053.

[14] 余青,刘德福,陈涛. 单晶蓝宝石衬底晶片的化学机械抛光工艺研究[J]. 表面技术,2017,46(3):253-261. DOI:10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2017.03.038.

[15] EVANS C J,PAUL E,DORNFELD D,*et al.* Material removal mechanisms in lapping and polishing[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology,2003,52(2):611-633. DOI:10.1016/S0007-8506(07)60207-8.

[16] 周艳,潘国顺,史晓磊,等. LED 蓝宝石衬底抛光表面原子台阶形貌及其周期性研究[J]. 光学精密工程,2017,25(1):100-106. DOI:10.3788/OPE.20172501.0100.

[17] 刘金玉,刘玉岭,项霞,等. 磨料对蓝宝石衬底去除速率的影响[J]. 半导体技术,2010,35(11):1064-1066. DOI:10.3969/j.issn.1003-353x.2010.11.004.

(责任编辑:黄晓楠 英文审校:崔长彩)