

文章编号 1004-924X(2017)01-0100-07

# LED 蓝宝石衬底抛光表面原子台阶形貌 及其周期性研究

周 艳<sup>1,2,3</sup>, 潘国顺<sup>1,2,3\*</sup>, 史晓磊<sup>1,2,3</sup>, 龚 桦<sup>1,2,3</sup>, 邹春莉<sup>1,2,3</sup>, 汤皎宁<sup>4</sup>

(1. 清华大学 摩擦学国家重点实验室, 北京 100084;

2. 深圳清华大学 研究院深圳市微纳制造重点实验室, 广东 深圳 518057;

3. 广东省光机电一体化重点实验室, 广东 深圳 518057;

4. 深圳市特种功能材料重点实验室 深圳大学, 广东 深圳 518060)

**摘要:** LED 蓝宝石衬底的表面质量会极大影响到后续外延质量, 进而影响到 LED 器件性能。蓝宝石研磨片经  $\text{Al}_2\text{O}_3$  磨粒粗抛液、 $\text{SiO}_2$  磨粒精抛液下进行化学机械抛光 (CMP), 最终表面经原子力显微镜 (AFM) 所测表面粗糙度达到 0.101 nm, 获得亚纳米级粗糙度超光滑表面, 并呈现出原子台阶形貌。同时, 通过使用 Zygo 表面形貌仪、AFM 观察蓝宝石从研磨片经  $\text{Al}_2\text{O}_3$  粗抛液、 $\text{SiO}_2$  精抛液抛光后的表面变化, 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。通过控制蓝宝石抛光中的工艺条件, 获得 a-a 型、a-b 型两种不同周期规律性的台阶形貌表面, 并探讨不同周期规律性台阶形貌的形成机理。

**关键词:** 化学机械抛光; 蓝宝石; 原子台阶形貌

**中图分类号:** TH161+.14 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20172501.0100

## Atomic step morphology research of LED sapphire substrate polishing surface and its periodicity

ZHOU Yan<sup>1,2,3</sup>, PAN Guo-shun<sup>1,2,3\*</sup>, SHI Xiao-lei<sup>1,2,3</sup>,  
GONG Hua<sup>1,2,3</sup>, ZOU Chun-li<sup>1,2,3</sup>, TANG Jiao-ning<sup>4</sup>

(1. State Key Laboratory of Tribology, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. Shenzhen Key Laboratory of Micro/Nano Manufacturing,

Research Institute of Tsinghua University in Shenzhen, Shenzhen 518057, China;

3. Guangdong Provincial Key Laboratory of Optomechatronics, Shenzhen 518057, China;

4. Shenzhen Key Laboratory of Special Functional Materials,  
Shenzhen University, Shenzhen 518060)

\* Corresponding author, E-mail: pang\_s@tsinghua.edu.cn

**Abstract:** Surface quality of LED sapphire substrate influences epitaxy quality greatly, and further

**收稿日期:** 2016-06-10; **修订日期:** 2016-07-17.

**基金项目:** 国家自然科学基金重大研究计划重点资助项目 (No. 91223202); 国家重点基础研究发展计划 (973 计划) 资助项目 (No. 2011CB013102); 国家自然科学基金创新研究群体科学基金资助项目 (No. 51321092); 深圳大学深圳市特种功能材料重点实验室开放基金资助项目 (No. T201404)

influences the performance of LED devices. After the chemical mechanical polishing (CMP) of slurry including  $\text{Al}_2\text{O}_3$  abrasive and  $\text{SiO}_2$  abrasive of sapphire grinding wafer, finally ultra smooth surface of sub-nanometric roughness was achieved with surface roughness reaching 0.101 nm measured by atomic force microscope (AFM) and atomic step morphology was presented. Using Zygo profiler and AFM to observe the variations of surface of sapphire grinding wafer from being polished by  $\text{Al}_2\text{O}_3$  abrasive slurry to  $\text{SiO}_2$  abrasive slurry, the generation reason of atomic step morphology of sapphire surface was elaborated, and the CMP removal mechanism of the sapphire atomically ultra-smooth surface was proposed. Through controlling the process conditions of sapphire polishing, a-a type and a-b type atomic step periodic morphologies were obtained respectively. The experimental result shows the chemical reaction speed of double-atom layer 6H1, 6H2 of different adsorptive energy between layers is slightly different. When the revolving speed is relatively slower and mechanical effect  $R_m$  is slightly weaker than chemical effect, the difference of chemical reaction speed  $R_c$  of different double-atom layer is also presented, and mechanical removal only acts on softening double-atom layer with sapphire polishing surface presenting step morphology of different width of a-b type; while when the revolving speed is relatively faster and mechanical effect  $R_m$  is slightly stronger than chemical effect, the mechanical removal speed of each double-atom layer is the same with sapphire polishing surface presenting step morphology of the same width of a-a type.

**Key words:** chemical mechanical polishing; sapphire; atomic step morphology

## 1 引言

蓝宝石单晶具有硬度高、透光性好、电绝缘性优良和化学性能稳定等优点,被广泛应用于LED半导体外延衬底、精密仪器仪表窗口等领域<sup>[1]</sup>。目前,蓝宝石是应用最广泛的LED衬底材料。

LED蓝宝石衬底晶片的加工工艺基本流程为长晶、切片、磨削、研磨、抛光与清洗<sup>[2]</sup>等。衬底晶片的表面质量及表面缺陷均会影响到后续GaN外延生长质量;因此,衬底晶片的抛光对高性能器件制造极其重要。蓝宝石( $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ )的硬度(9)稍差于金刚石(10)和碳化硅(9.2),且化学性质稳定,因此难以加工,生产效率低、加工成本高。另一方面,基于对LED产品发光效率和使用寿命的提高,GaN外延生长对衬底晶片的表面加工质量要求更加严苛<sup>[3-4]</sup>。化学机械抛光(CMP)利用磨粒的机械磨削和试剂的化学腐蚀共同作用,实现对工件表面材料的去除,形成光滑平坦的表面<sup>[5-19]</sup>,已成为半导体表面加工行业的主导技术。

本文通过使用 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 粗抛光液和 $\text{SiO}_2$ 精抛光液,对蓝宝石表面进行化学机械抛光,最终获得亚纳米级超光滑表面,并呈现出原子台阶形貌;同时,阐述蓝宝石表面原子台阶形貌的形成原因,及

其原子级去除机理。通过控制蓝宝石抛光的工艺条件,获得a-a型和a-b型不同周期规律性的台阶形貌表面,并探讨了其形成机理。

## 2 实验部分

抛光对象是直径为50.8 mm(2 int)、厚度约为370  $\mu\text{m}$ 蓝宝石晶片(0001)c面。采用沈阳科晶1000S型单面抛光机进行抛光试验,工艺参数如下:上盘转速为60 rpm,下盘转速为140 rpm或80 rpm,载重为400  $\text{g}/\text{cm}^2$ ,抛光液流速为70  $\text{ml}/\text{min}$ ,每次抛光时间为30 min。粗抛液包含 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 磨粒,精抛液包含 $\text{SiO}_2$ 磨粒。

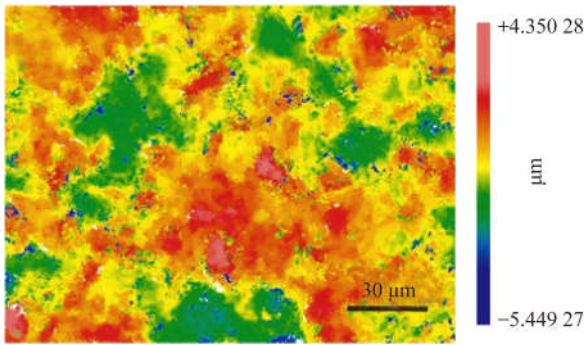
用Zygo New View 7200白光干涉表面轮廓仪观测蓝宝石表面形貌;用Bruker Dimension Icon原子力显微镜(AFM)观测蓝宝石表面形貌及检测表面粗糙度 $R_a$ 。

## 3 结果与讨论

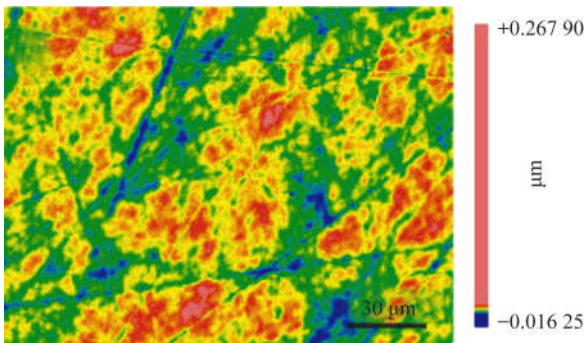
### 3.1 蓝宝石表面原子台阶形貌的形成

结合图1蓝宝石表面Zygo形貌和图2表面AFM可知,蓝宝石原始研磨片表面较粗糙,有深划伤,表面粗糙度AFM- $R_a(5 \mu\text{m} \times 5 \mu\text{m})$ 为

44.6 nm。经 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 抛光液抛光后,表面有少量划痕,表面 AFM-Ra 明显下降,达到 0.169 nm (1 μm×1 μm);再经 SiO<sub>2</sub> 抛光液抛光后,表面呈现清晰的原子台阶形貌,AFM-Ra 可达 0.101 nm (1 μm×1 μm)。图 2(d)是图 2(c)原子台阶的横截面图,可见这种原子台阶的高度约为 0.2 nm。

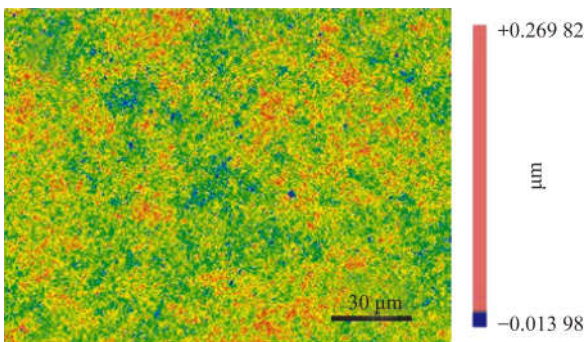


(a)原始研磨片  
(a)Grinding wafer



(b)Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 粗抛光液抛光后

(b)After polishing by the slurry including Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> abrasive



(c)SiO<sub>2</sub> 精抛光液抛光后

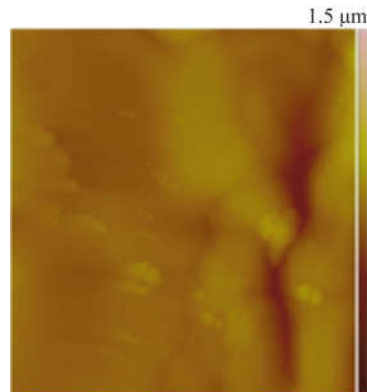
(c)After polishing by the slurry including Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> abrasive

图 1 蓝宝石表面的 Zygo 形貌图(0.18 mm×0.13 mm)

Fig. 1 Zygo profiler morphology of sapphire surface (0.18 mm×0.13mm)

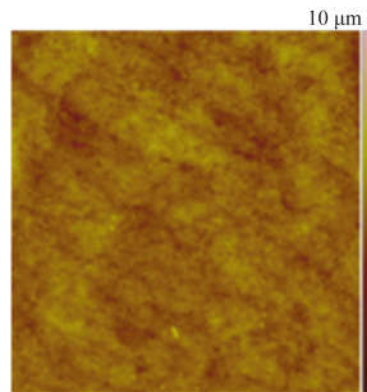
通过晶体学参数建模(如图 3),六方晶体蓝宝石是由具有一定规律排列的 Al-O 铝氧双原子

层所组成的;铝氧双原子层则是由铝原子和氧原子结合而成。基于六方晶系晶体理论,诸如蓝宝石、碳化硅这类六方晶系晶体有如下特性:如果其(0001)c 面的晶面取向偏差为 0°时,可获得绝对光滑的表面。然而,对于蓝宝石六方晶体的(0001)c 面,由于前段切割、研磨等制造工序的影响,c 轴会存在取向偏转误差,导致整个紧密层层堆垛的铝氧复合双原子层发生了相应的偏转;从而以致于蓝宝石表面抛光到超光滑程度后,可得到如图 2(c)所示的双原子层层堆叠的台阶形貌。通过晶体学参数计算,蓝宝石 Al-O 双原子层的厚度为 0.216 nm,该值与前面提及的实际测量台阶横截面曲线反映的台阶高度值吻合,说明当蓝宝石表面形成台阶形貌时,蓝宝石表面就已达原子级的平滑程度。一般来说,蓝宝石表面 R<sub>a</sub> 小于 0.15 nm 时,表面就能出现原子台阶形貌。可见,抛光后超光滑表面原子台阶形貌能反映出六方晶体的原子结构。



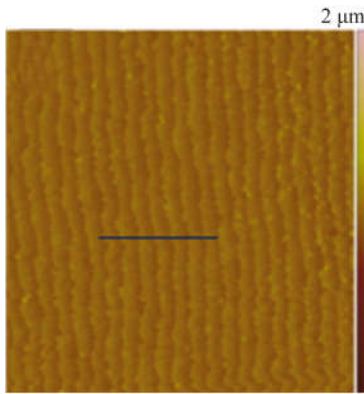
(a) 原始研磨片, R<sub>a</sub>:44.6 nm(5 μm×5 μm)

(a)Grinding wafer, R<sub>a</sub>:44.6 nm(5 μm×5 μm)



(b)Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 粗抛光液抛光后, R<sub>a</sub>:0.169 nm(1 μm×1 μm)

(b)After polishing by the slurry including Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> abrasive, R<sub>a</sub>:0.169 nm(1 μm×1 μm)



(c) SiO<sub>2</sub> 精抛光液抛光后, R<sub>s</sub>: 0.101 nm (1 μm × 1 μm)

(c) After polishing by the slurry including Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> abrasive,

R<sub>s</sub>: 0.101 nm (1 μm × 1 μm)

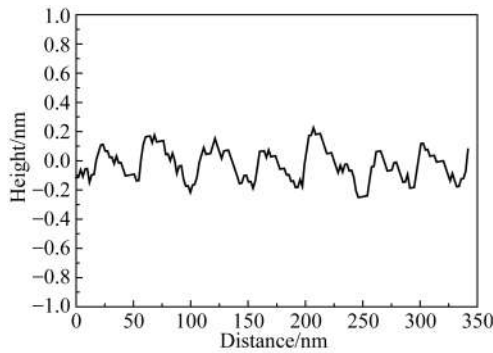


图 c 中直线的横截面图

(d) Cross-sectional image along the lines in Fig. c

图 2 蓝宝石表面的 AFM 图

Fig. 2 AFM morphology images of sapphire surface

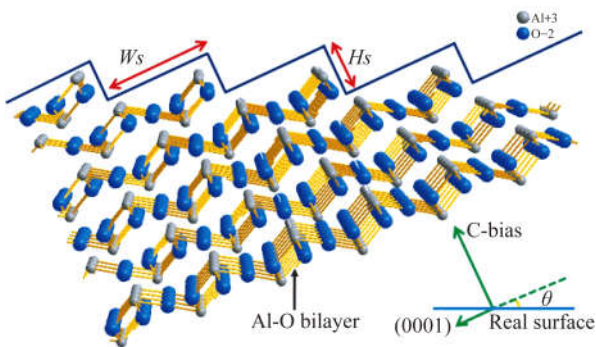
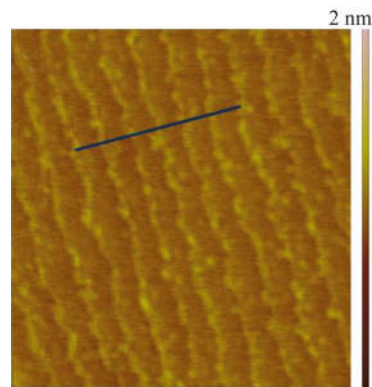


图 3 蓝宝石六方晶体的原子台阶模型。Ws, Hs, θ 分别表示台阶宽度、台阶高度、偏转误差角度。tg(θ) = Hs/Ws<sup>[9]</sup>。对于蓝宝石,误差偏转角度 θ 通常小于 0.5°

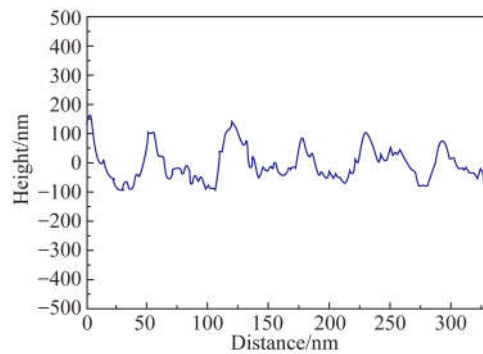
Fig. 3 Atomic models of hexagonal crystal sapphire step-terrace structure. W<sub>s</sub>, H<sub>s</sub> and θ are the step width, step height and misorientation angle, respectively. tg(θ) = H<sub>s</sub>/W<sub>s</sub><sup>[9]</sup>. Towards sapphire, the normal value of θ was below 0.5°

### 3.2 蓝宝石表面原子台阶形貌的周期性分析

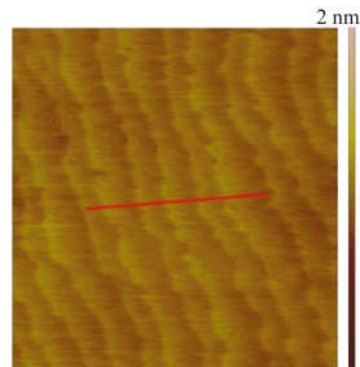
由图 4 可知,在不同工艺条件下,蓝宝石抛光后表面台阶形貌有明显不同。在相同压力 400 g/cm<sup>2</sup>、上盘转速 60 rpm 条件下,下盘转速为 140 rpm 时,蓝宝石抛光表面呈现 a-a 型同宽度台阶形貌,其横截面曲线如图 4(b)所示;而当其他条件相同,下盘转速下降至 80 rpm 时,蓝宝石抛光表面呈现 a-b 型宽-窄台阶形貌,其横截面曲线如图 4(d)所示。



(a)



(d)



(c)

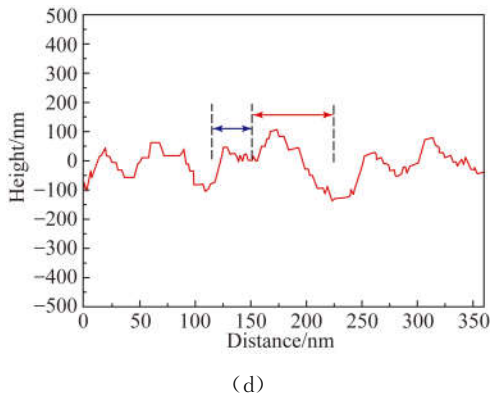


图 4 (a), (c) 不同工艺参数下蓝宝石抛光后表面的 AFM 图(1  $\mu\text{m} \times 1 \mu\text{m}$ )。压力:400  $\text{g}/\text{cm}^2$ , 上盘转速:60 rpm, 下盘转速: a. 140 rpm, b. 80rpm。 (b), (d) 分别是图 a、c 中直线的横截面图

Fig. 4 (a), (c) AFM images of sapphire polished surface (1  $\mu\text{m} \times 1 \mu\text{m}$ ) under different parameters, Downward pressure:400  $\text{g}/\text{cm}^2$ , up plate rotating speed: 60 rpm, down plate rotating speed: a. 140 rpm, b. 80 rpm. (b), (d) cross-sectional image along the lines in Fig. a and Fig. c

3.3 机理分析

化学机械抛光是通过化学反应和机械磨削来实现材料光滑表面的。根据前人研究和前期关于蓝宝石抛光表面残留物研究<sup>[20-22]</sup>, 如图 5 所示, 蓝宝石  $\text{Al}_2\text{O}_3$  在抛光过程中与水发生水合反应, 生成水合氧化铝  $\text{AlO}(\text{OH})$  和  $\text{Al}(\text{OH})_3$ ; 同时, 蓝宝石  $\text{Al}_2\text{O}_3$  与磨粒  $\text{SiO}_2$  在抛光过程中会发生固相反应, 生成更软、与磨粒  $\text{SiO}_2$  黏附性更强的硅酸铝; 硬度适中的磨粒  $\text{SiO}_2$  对表面软质生成物进行原子级机械去除, 可形成原子级超光滑表面。

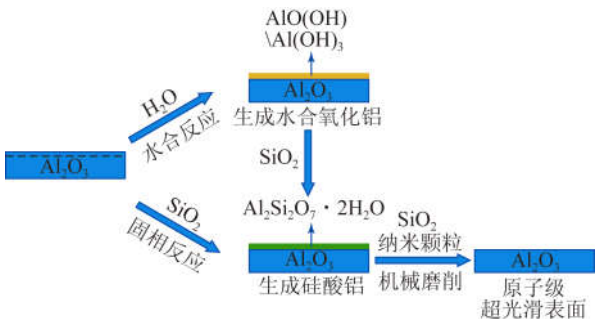


图 5 蓝宝石晶片原子级超光滑表面形成及其 CMP 去除示意图

Fig. 5 Formation of atomically ultra-smooth sapphire wafer surface and its CMP removal model

如前所述, 蓝宝石晶体是由 Al-O 复合双原子层堆积而成的。一个蓝宝石晶胞里有 6 层 Al-O 双原子层。如图 6 所示, 根据蓝宝石原子排布中双原子层层间能量规律性及层间吸附能的差异, 双原子层又分为  $6\text{H}_1$ 、 $6\text{H}_2$ 。所以, 当蓝宝石表面发生化学反应时, 层间吸附能不同的  $6\text{H}_1$ 、 $6\text{H}_2$  双原子层发生化学反应的速度  $R_r$  会稍有不同。

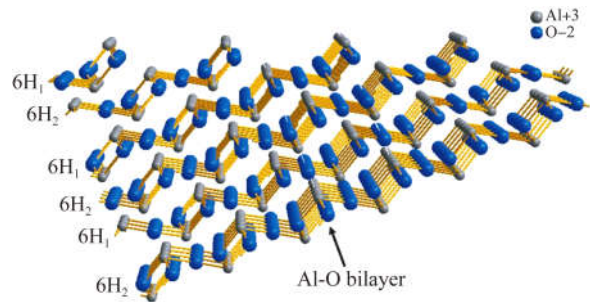
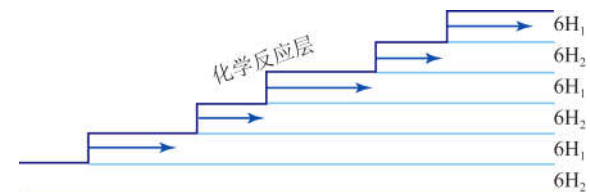


图 6 蓝宝石晶体的原子排布与双原子层层间吸附能的规律

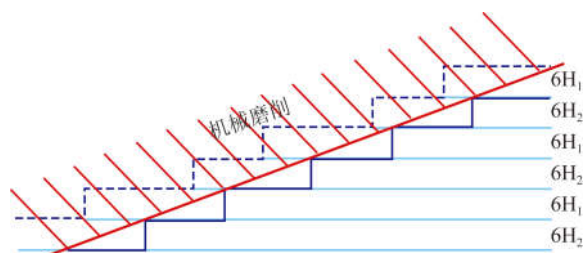
Fig. 6 Model of sapphire crystal's atom configuration and its bilayer adsorption energies between neighboring bilayers

如图 7 所示, 当相同压力下, 转速较小时, 机械作用  $R_m$  比化学作用  $R_c$  稍弱时, 由于双原子层层间吸附能的差异性, 不同双原子层的化学反应速度  $R_c$  的差异性也表现出来, 机械去除只作用于已软化(发生化学反应)的双原子层, 所以, 蓝宝石抛光表面呈现不同的台阶宽度形貌, 即 a-b 宽窄的台阶形貌。而当转速较大, 机械作用  $R_m$  比化学作用  $R_c$  稍强时, 每层双原子层的机械去除速率一样, 所以蓝宝石抛光表面呈现 a-a 同宽度的台阶形貌。



(a) 当相同压力下, 转速较小时, 机械作用  $R_m$  比化学作用  $R_c$  稍弱时, 形成 a-b 型台阶形貌

(a) When lower rotating speed, mechanical effect is weaker than chemical effect, resulting in the generation of a-b type step-terrace structure



(b)当转速较大,机械作用  $R_m$  比化学作用  $R_c$  稍强时,形成 a-a 型台阶形貌

(b)When higher rotating speed, chemical effect is weaker than mechanical effect, resulting in the generation of a-a type step-terrace structure

图7 蓝宝石抛光表面不同台阶形貌的形成机理

Fig.7 Generation mechanism of step-terrace structure of sapphire polished surface, under the same downward pressure

## 4 结论

蓝宝石衬底表面的原子台阶形貌,会极大影响到LED电子器件的性能。蓝宝石研磨片经  $Al_2O_3$  磨粒粗抛液、 $SiO_2$  磨粒精抛液下进行化学机械抛光(CMP),最终表面经原子力显微镜(AFM)所测

表面粗糙度达到  $0.101\text{ nm}$  ( $1\text{ mm} \times 1\text{ mm}$ ),获得原子级超光滑表面,呈现出原子台阶形貌。由于蓝宝石六方晶体的  $c$  轴取向偏差,导致其层层堆垛的铝氧复合双原子层的偏转,从而当  $c$  面经原子级抛光后, $c$  面表面会显现出原子台阶形貌。可见,超光滑表面原子台阶形貌,可反映出材料的晶体结构。蓝宝石通过水合反应、固相化学反应,在表面生成软质物;通过使用硬度适中的磨粒  $SiO_2$ ,对表面软质生成物进行原子级机械去除,形成蓝宝石原子级超光滑表面。通过控制蓝宝石抛光的工艺条件,获得 a-a 型、a-b 型两种不同周期规律性的台阶形貌表面。当蓝宝石表面发生化学反应时,层间吸附能不同的  $6H_1$ 、 $6H_2$  双原子层发生化学反应的速度  $R_c$  会稍有不同。当转速较小时,机械作用  $R_m$  比化学作用  $R_c$  稍弱时,不同双原子层的化学反应速度  $R_c$  的差异性也表现出来,机械去除只作用于已软化的双原子层,蓝宝石抛光表面呈现 a-b 型不同宽窄的台阶形貌;而当转速较大,机械作用  $R_m$  比化学作用  $R_c$  稍强时,每层双原子层的机械去除速率一样,蓝宝石抛光表面呈现 a-a 同宽度的台阶形貌。

## 参考文献:

- [1] ELENA R D, LEONID A L, VALERIAN P. *Sapphire: Material, Manufacturing, Applications* [M]. USA: Springer Science + Business Media, 2009, 1-153.
- [2] 范志刚,刘建军,肖昊苏,等. 蓝宝石单晶的生长技术及应用研究进展[J]. 硅酸盐学报, 2011, 39(5): 880-891.  
FAN ZH G, LIU J J, XIAO H S, *et al.*. Research progress on growth technique and application of sapphire single crystal [J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2011, 39(5): 880-891. (in Chinese)
- [3] 周兆忠,袁巨龙,文东辉. 蓝宝石衬底的超光滑表面加工进展[J]. 航空精密制造技术, 2009, 45(3): 8-13.  
ZHOU ZH ZH, YUAN J L, WEN D SH. Survey on the progress of ultra-smooth sapphire wafer surface [J]. *Aviation Precision Manufacturing Technology*, 2009, 45(3): 8-13. (in Chinese)
- [4] 张保国,刘玉岭. 蓝宝石晶片加工中的技术关键和对策[J]. 人工晶体学报, 2016, 45(4): 859-567.  
ZHANG B G, LIU Y L. Key technology and strategies

- in sapphire wafer processing [J]. *Journal of synthetic crystals*, 2016, 45(4): 859-567. (in Chinese)
- [5] ZHU H L. *Chemical Mechanical Polishing (CMP) of sapphire* [D]. USA: the State University of New Jersey, 2002, 129-134.
- [6] HU X K, SONG ZH T, PAN ZH C, *et al.*. Planarization machining of sapphire wafers with boron carbide and colloidal silica as abrasives [J]. *Applied Surface Science*, 2009(255): 8230-8234.
- [7] XU L, ZOU CH L, SHI X L, *et al.*. Fe-Nx/C assisted chemical-mechanical polishing for improving the removal rate of sapphire [J]. *Applied Surface Science*, 2015, 343: 115-120.
- [8] WANG Y G, *et al.*. A Review on the CMP of SiC and sapphire wafers [J]. *Advanced Materials Research*, 2010(126-128): 429-434.
- [9] 赵之雯. 蓝宝石衬底纳米级超光滑表面加工工艺研究[J]. 新技术新工艺, 2008, 2: 27-30.  
ZHAO ZH W. The research on CMP technology of sapphire with nano surface [J]. *New Technology*, 2008, 2: 27-30. (in Chinese)
- [10] ZHANG Z F, YAN W, ZHANG L, *et al.*. Effect of mechanical process parameters on friction be-

- havior and material removal during sapphire chemical mechanical polishing [J]. *Microelectron. Eng.*, 2011, 88:3020-3023.
- [11] AIDA H, DOI T, TAKEDA H, *et al.*. Ultraprecision CMP for sapphire, GaN, and SiC for advanced optoelectronics materials [J]. *Curr. Appl. Phys.*, 2012, 12:S41-S46.
- [12] XU W H, LU X C, *et al.*. Effects of the ultrasonic flexural vibration on the interaction between the abrasive particles; pad and sapphire substrate during chemical mechanical polishing (CMP) [J]. *Appl. Surf. Sci.*, 2011, 257:2905-2911.
- [13] ZHANG Z F, LIU W L, SONG ZH T, *et al.*. Two-step chemical mechanical polishing of sapphire substrate [J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 2010, 157, H688-691.
- [14] XU W H, LU X C, *et al.*. Ultrasonic flexural vibration assisted chemical mechanical polishing for sapphire substrate [J]. *Appl. Surf. Sci.*, 2010, 256, 3936-3940.
- [15] 王建彬, 朱永伟, 王加顺, 等. 研磨方式对单晶蓝宝石亚表面损伤层深度的影响 [J]. *人工晶体学报*, 2014, 43(5):1099-1104.  
WANG J B, ZHU Y W, WANG J S, *et al.*. Effect of lapping methods on subsurface damage depth of single crystal sapphire [J]. *Journal of synthetic crystals*, 2014, 43(5):1099-1104. (in Chinese)
- [16] 白林山, 熊伟, 储向峰, 等. SiO<sub>2</sub>/CeO<sub>2</sub> 复合磨粒的制备及在蓝宝石晶片抛光中的应用 [J]. *光学精密工程*, 2014, 22(5):1289-1295.  
BAI L SH, XIONG W, CHU X F, *et al.*. SiO<sub>2</sub>/CeO<sub>2</sub> composite particles and their applications to CMP on sapphire substrates [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(5):1289-1295. (in Chinese)
- [17] WANG Y G, ZHANG L C. A review on the CMP of SiC and sapphire wafers [J]. *Advanced Materials Research*, 2010. 126-128, 429-424.
- [18] LEE H, KASUGA H, OHMORI H, *et al.*. Application of electrolytic in-process dressing (ELID) grinding and chemical mechanical polishing (CMP) process for emerging hard-brittle materials used in light-emitting diodes [J]. *J. Cryst. Growth*, 2011, 326:140-146.
- [19] LIN Z C, HUANG W S, TSAI J S. A study of material removal amount of sapphire wafer in application of chemical mechanical polishing with different polishing pads [J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2012, 26(8):2353-2364.
- [20] ZHU H, TESSAROTO L A, SABIA R, *et al.*. Chemical mechanical polishing (CMP) anisotropy in sapphire [J]. *Appl. Surf. Sci.*, 2004, 236:120-130.
- [21] ROGOV V V, RUBLEV N D, KROTENKO T L, *et al.*. A Study of Intensity of tribochemical contact interaction between a polishing compound and sapphire in machining [J]. *J. Superhard Mater.*, 2008, 30:273-275.
- [22] ZHOU Y, PAN G S, SHI X L, *et al.*. AFM and XPS studies on material removal mechanism of sapphire wafer during chemical mechanical polishing (CMP) [J]. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2015, 26:9921-9928.

#### 作者简介:



周艳 (1982—), 女, 湖南衡阳人, 高级工程师, 2007 年于中国科学院广州化学研究所获得硕士学位, 主要从事超精表面抛光研究。E-mail: zhouyan@tsinghua-sz.org



潘国顺 (1965—), 男, 河北吴县人, 研究员。1998 年于中国矿业大学 (北京) 获得博士学位, 主要从事亚纳米级化学机械抛光、摩擦学设计等方面的研究。E-mail: pangsh@tsinghua.edu.cn