

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2022.09.010

带锥台托盘 KH_2PO_4 晶体生长与位错分布

胡今三, 李明伟, 王鹏飞

(重庆大学 能源与动力工程学院, 重庆 400044)

摘要: 利用光学显微镜对采用锥台托盘及传统平托盘生长的晶体进行位错腐蚀观察, 发现锥台托盘生长的晶体上半部分位错分布与平托盘生长的晶体相似, 部分区域位错密度低于平托盘生长的晶体。对于锥台托盘生长的晶体下半部分, 其柱面位错缺陷很少, 位错集中在与锥台直接接触的下锥面。下锥面的存在阻止了柱面底部新位错的形成, 为柱面生长提供了更好的生长条件。硬度分析表明使用锥台托盘一定程度上提高了晶体结晶完整性。

关键词: KDP 晶体; 化学腐蚀; 位错; 硬度检测

中图分类号: O782.1

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2022)09-106-09

The growth and dislocation distribution of KH_2PO_4 crystal through a frustum platform

HU Jinsan, LI Mingwei, WANG Pengfei

(School of Energy and Power Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China)

Abstract: The dislocation etch of the crystal grown by frustum platform and ordinary flat platform was observed by optical microscope. It was found that the dislocation distribution in the upper half of the crystal grown by the frustum platform was similar to that of the crystal grown by the flat platform, and its dislocation density in some areas was lower than that of the crystal grown on the flat platform. For the lower half of the crystal grown on the frustum platform, there were few dislocation defects on the prismatic faces, and the dislocations concentrated on the lower pyramidal surface that was in direct contact with the frustum. The existence of the lower pyramidal faces prevented the formation of new dislocations at the bottom of the prismatic faces and provided better growth conditions for the growth of the prismatic faces. Hardness analysis showed that the use of the frustum platform contributed to the crystalline perfection of the prismatic faces partly.

Keywords: KDP crystal; chemical etching; dislocation; hardness testing

磷酸二氢钾(KH_2PO_4 , KDP)晶体因其优异的光电及非线性光学特性成为惯性约束(ICF)核聚变激光驱动系统中不可或缺的材料^[1]。Zaitseva 等^[2]通过对溶液进行预处理及连续过滤等操作实现了高过饱和度下的 KDP 晶体快速生长。位错生长机制在 KDP 快速生长中发挥着重要作用^[3]。位错的存在使得晶面生长速

收稿日期: 2020-02-28 网络出版日期: 2020-05-27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51476014)。

Supported by National Natural Science Foundation of China (51476014).

作者简介: 胡今三(1994—), 男, 硕士研究生, 主要从事晶体材料制备中的热物理研究, (E-mail) 347022506@qq.com。

通信作者: 李明伟, 男, 教授, 博士生导师, (E-mail) ao-weixia@126.com。

度加快^[4],控制各晶面位错密度也有助于取得合适的晶体外形^[5]。同时,位错也是 KDP 晶体中普遍存在的一种线缺陷,在晶体中沿弹性能最低方向延伸^[6]。研究表明,过高的位错密度会降低激光损伤阈值^[7],影响光学均匀性^[8],密集复杂位错还有可能导致裂纹的产生^[2]。国内外对于位错已有大量的研究,Lutsau 等^[9]利用 X 射线形貌术对位错进行观察,认为位错主要源于籽晶表面、包裹物及外来颗粒。Sangwal 等^[10]分析了不同腐蚀剂对 KDP 晶面的不同腐蚀效果,认为能让晶体快速溶解的腐蚀介质可以获得更好的腐蚀效果。Belouet, Klapper 等^[11-12]利用 X 射线形貌术研究了 KDP 晶体中位错的走向与种类。乔景文,陈金长,黄依森等^[13-15]利用化学腐蚀,X 射线形貌术等手段研究了传统法生长晶体中的位错走向种类及分布。鲁晓东,钟德高等^[16-17]利用化学腐蚀研究了点籽晶快速生长法所得晶体的位错形态与分布。滕冰等^[18]利用同步辐射 X 射线形貌术研究了利用点籽晶快速生长法生长晶体中的位错,发现粗糙柱面与不均匀溶解会在柱面产生较多位错。

位错的形成与台阶失稳及包裹物的存在有着密切关系,台阶失稳形成悬垂层包裹母液,当悬垂层发生屈曲即产生新的位错。晶体生长过程中若晶面过饱和度分布不均,当台阶由高过饱和度区推移至低过饱和度区时就易产生台阶聚进而在台阶列顶部形成悬垂层包裹母液诱发位错形成^[19]。托盘形状对流动有着重要影响^[20],使用托盘生长时晶体柱面与托盘交界处的 Ekman 流使得柱面底部形成低过饱和度区^[21],易产生台阶聚进而形成包裹物、位错进而影响晶体质量。为此,Wang 等^[22]提出了一种带锥台的新型托盘,并进行了数值模拟,发现锥台的增加使得晶体柱面的过饱和度增大,均匀性得到改善,且晶体尺寸越大改善越明显,但没有对生长晶体作位错分析,更未对额外增加生长的锥台侧面晶体的质量作考察。文中将利用化学腐蚀对使用锥台托盘及平托盘生长的晶体的位错进行显微光学观察,研究使用锥台托盘生长对晶体位错分布的影响并分析其原因。

1 实验

1.1 晶体生长

晶体生长托盘如图 1 所示,锥台顶部为面积 $20\text{ mm} \times 20\text{ mm}$ 的正方形平台,锥台斜面倾斜角度为 60° ,采用亚克力材料切割制成,利用有机胶水粘接在平托盘中心位置。生长采用锥头籽晶,切割自“转晶法”所得晶体的锥头部分。将大小合适的锥头籽晶利用环氧树脂胶粘接在锥台上表面中央,籽晶四边与锥台边齐平。



图 1 锥台托盘外形

Fig. 1 Frustum platform shape

晶体生长采用原料为国药集团化学试剂有限公司的特纯级 KDP,溶于电阻率为 $18.2\text{ M}\Omega \cdot \text{cm}$ 的去离子超纯水中,配制 $2.4\text{ L } 40^\circ\text{C}$ 饱和溶液;利用孔径为 $0.22\ \mu\text{m}$ 微孔滤膜滤去溶液中的不溶性杂质颗粒,再置于 65°C 水浴中过热 48 h 。将溶液降温至 42°C 时引入籽晶,并用水封装密封,保持 $3\sim 5\text{ min}$ 待籽晶表面微溶,迅速降温至 38°C 并开始执行降温程序,静置 12 h 待籽晶恢复,开始晶体生长。降温过程由厦门宇电 AI-716P 型温度控制器控制,通过晶体体积增量反推溶质消耗量估算每日降温速度,保证生长溶液过饱和度保持在 3% 。降温曲线如图 2 所示,旋转模式为正转 30 s —停 5 s —反转 30 s ,各晶体生长条件如表 1 所示。

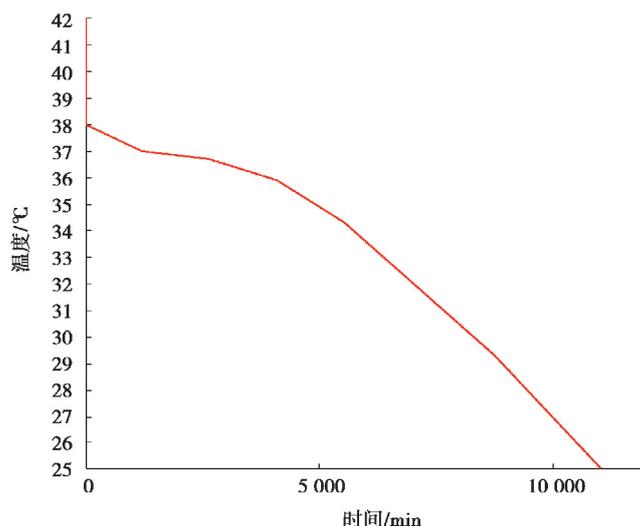


图 2 降温曲线

Fig. 2 Cooling curve

表 1 各晶体生长条件

Table 1 Crystal growth conditions

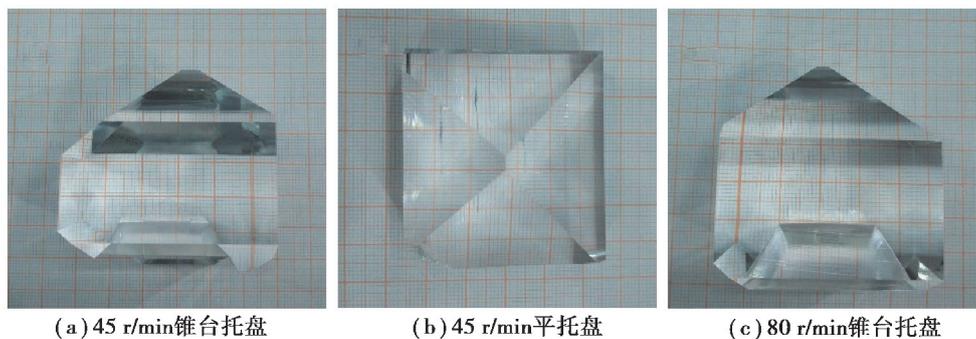
晶体编号	a 轴	b 轴	c 轴
转速/(r · min ⁻¹)	45	45	80
托盘	锥台托盘	平托盘	锥台托盘

1.2 晶体表征

利用化学腐蚀法对晶体(100)面位错缺陷进行研究。(100)面使用高目数砂纸、丝绸与 Al_2O_3 抛光粉进行抛光,消除肉眼可见划痕后使用磷酸冲洗消除细微机械划痕。在室温下使用腐蚀液(180 mL 冰乙酸+15 mL 水+12 滴浓硫酸^[13])分别对样品腐蚀(约 4 min),腐蚀样品放置光学显微镜(尼康 90i)下进行观察。显微硬度测量所用仪器为 MH-5L 型显微硬度计,保载时间 5 s,分别测试载荷在 10 g, 25 g, 50 g, 100 g 和 200 g 下的显微硬度。

2 结果与讨论

生长出来的晶体如图 3 所示,2 颗锥台托盘生长的晶体透明无缺陷,在 c 轴上双向生长,产生了下锥面,平托盘生长的晶体在生长后期由于其中一角碰到托盘支柱,造成该角缺失,位错分析时将该角两邻边最外侧切除,不影响位错分析结果。



(a) 45 r/min 锥台托盘

(b) 45 r/min 平托盘

(c) 80 r/min 锥台托盘

图 3 生长晶体

Fig. 3 Crystal grown

2.1 位错分析

通过化学腐蚀可以获得直观的位错缺陷可视化分布,了解晶体各部分的缺陷情况及生长信息。对锥台托盘生长晶体与传统平托盘生长晶体的(100)面进行取样,取样晶片厚度为 10 mm,取样位置如图 4 和图 5 所示。对取样晶片进行化学腐蚀,并分别对腐蚀晶片 A 面和 B 面进行显微观察。

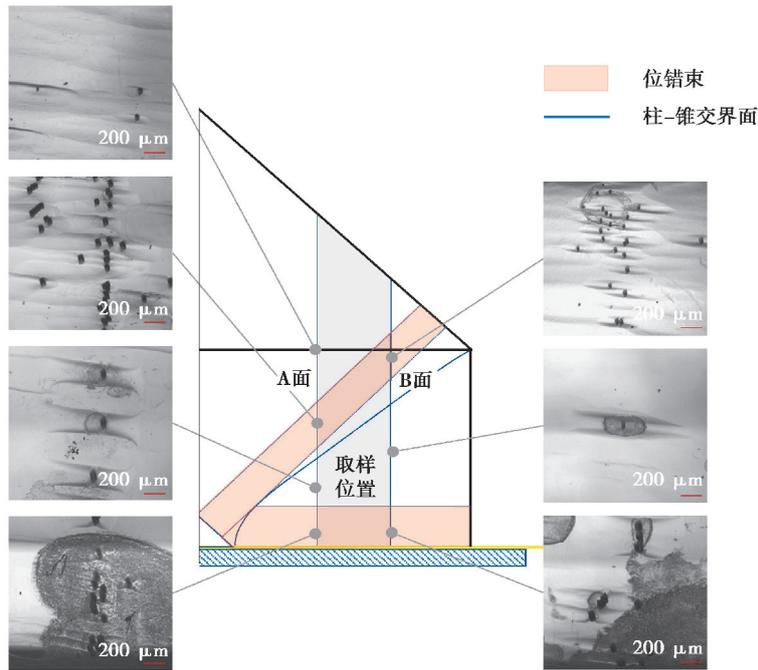


图 4 平托盘生长晶体化学腐蚀纵向取样位置示意图及腐蚀结果(横向在中轴线内)
Fig. 4 Schematic diagram of longitudinal sampling position and chemical etch results of the crystal grown by flat platform (transverse in the center axis)

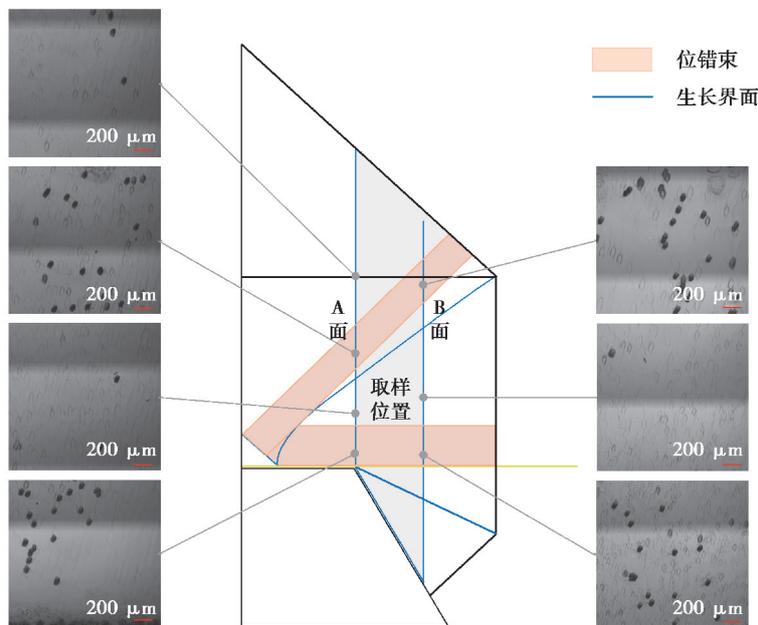


图 5 锥台托盘生长晶体化学腐蚀纵向取样位置示意图及腐蚀结果(横向在中轴线内)
Fig. 5 Schematic diagram of longitudinal sampling position and chemical etch results of the crystal grown by frustum platform (transverse in the center axis)

晶体中的位错来源可分为 2 部分,一部分形成于籽晶恢复过程中,与籽晶类型及其恢复条件有关;另一部分来源于生长过程,与晶体生长条件有关。由于都使用了同样类型的锥头籽晶以及相同的初期籽晶恢复过程,锥台托盘生长晶体高于锥台平面部分(图 5 粗黄线以上)与平托盘生长晶体的位错分布具有相似的特点,横向上,位错大多分布在(100)截面中轴线附近,位错分布宽度与该面籽晶宽度相当,中轴线两侧位错较少,如图 6 所示。纵向上,从籽晶发散出的位错主要分为 2 个部分,一部分在锥面延伸,另一部分位错在生长初期穿过柱-锥交界面,偏转至 $[100]$ 方向在柱面延伸^[12],因此,在(100)截面上可以看到 2 个位错聚集区,一上一下分布在(100)截面中间区域(如图 3 和图 4 中的杏红色标注的位错束区域),籽晶类型与恢复条件相同时,后期生长条件的不同对位错分布没有显著影响,45 r/min 与 80 r/min 条件下的锥台托盘生长晶体位错密度与分布情况相似,总体腐蚀结果与文献[16]类似。

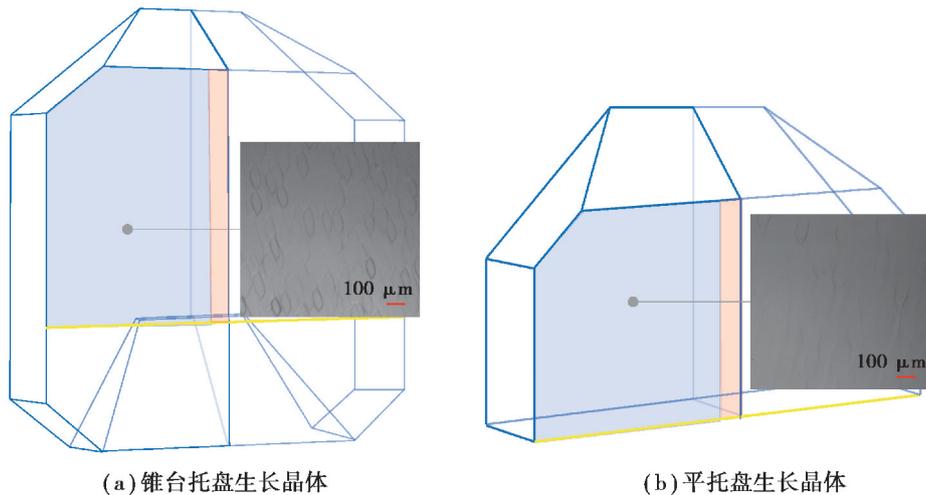
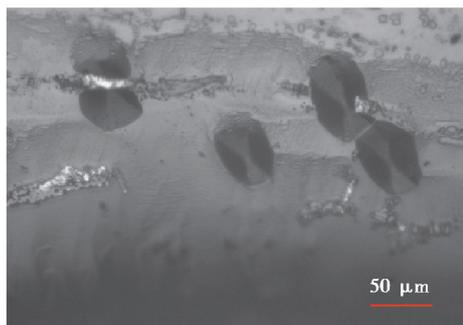


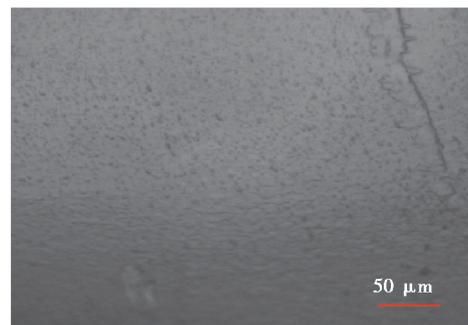
图 6 (100)截面中轴线外两侧腐蚀结果

Fig. 6 Etch results on both sides of the center axis of the crystal (100) section

由于两类托盘外形的差异导致了晶面生长条件的不同,晶面局部区域的位错分布也存在差别。在平托盘生长晶体的柱面下部发现了新的位错,如图 7(a)所示,这些位错所对应的截面内侧没有发现位错坑如图 7(b)所示。因此,可以判断这些位错形成于晶体生长过程中。而在锥台托盘生长晶体的粗黄线所在位置(相当于平托盘柱面下部位置)附近则很少出现位错,腐蚀表面较为干净,如图 7(c)所示。2 个因素导致了这种差异,一方面,两类托盘生长晶体时的柱面流场条件存在不同,Wang 等^[22]的模拟表明,平托盘生长晶体柱面下部与托盘交界处存在滞止涡胞,使得该处的溶质供应比较困难,形成低过饱和度区,推移至此的台阶易发生聚并,进而形成包裹物诱发位错形成;锥台托盘生长晶体因锥台斜面与晶体下锥面的存在,柱面悬空于溶液中,滞止涡胞消失,过饱和度分布更为均匀,减少了位错的产生。另一方面,使用平托盘生长时,晶体柱面与托盘平面直接接触,托盘旋转过程中,晶体与托盘的相互作用易催生新的位错^[5];而锥台托盘生长晶体由于下锥面的存在阻隔了这种相互作用,减少了柱面位错的产生。结果表明,锥台托盘生长晶体上半部分与平托盘生长晶体位错分布总体相近,局部区域位错缺陷少于平托盘生长晶体,整体质量高于平托盘生长晶体。



(a) 平托盘生长晶体柱面底部位错



(b) 平托盘生长晶体柱面底部位错对应内侧腐蚀面



(c) 锥台托盘生长晶体黄线附近腐蚀面

图 7 两类托盘晶体的位错分布

Fig. 7 The dislocation distribution of crystals grown by frustum platform and flat platform

由于锥台托盘特殊的几何外形,柱面得以在 $[001]$ 和 $[00\bar{1}]$ 两个方向延伸,增加了柱区的生长体积,如图 8 和图 9 所示的粗黄线以下部分,但新增加的这一部分柱区晶体是否能用,还有待考察。下面通过位错观察来分析这一部分的质量情况,为实际应用提供指导。

由于位错择优取向,源于籽晶的位错不会延伸至图 8 粗黄线以下,因而锥台托盘生长晶体下半部分的位错都形成于生长过程中,并且与各晶面的生长条件密切相关。其中,下锥面与锥台斜面的几何关系是影响晶面生长条件和晶体位错分布的主要因素。实际晶体生长中由于所采用的锥台,其斜面倾角为 60° ,出现了 2 种下锥面类型, $(10\bar{1})$ 面、 $(\bar{1}0\bar{1})$ 面。当只出现 $(10\bar{1})$ 面时,粗黄线以下区域的位错分布如图 8 所示,图中蓝线为柱-锥交界面,蓝线以下为 $(10\bar{1})$ 面生长扇区(Δ_2 区域),以上为 (100) 面生长扇区(Δ_1 区域)。最外侧自然生长面只包含 (100) 面生长扇区,位错密度几乎为零。而 C 截面只在靠下区域发现了位错,分布宽度约 1 cm,位错密度约为 1.3 cm^{-2} ,位错区上方为一段无位错区,腐蚀情况与自然柱面相似。 (100) 、 $(10\bar{1})$ 面生长条件的差异是造成上述腐蚀结果不同的原因,对于柱区部分, $(10\bar{1})$ 面的存在是其出现极低位错密度的关键,一方面, $(10\bar{1})$ 面与锥台斜面共同作用改善了柱面流场条件;另一方面,隔绝了柱面与托盘的直接接触,二者都有助于减少位错的产生。但对于 $(10\bar{1})$ 面自身,与托盘直接接触形成凹角使得该晶面流场条件变差的同时,又增加了晶面与托盘相互作用产生位错的几率,因而在 C 截面下部出现了较多位错。

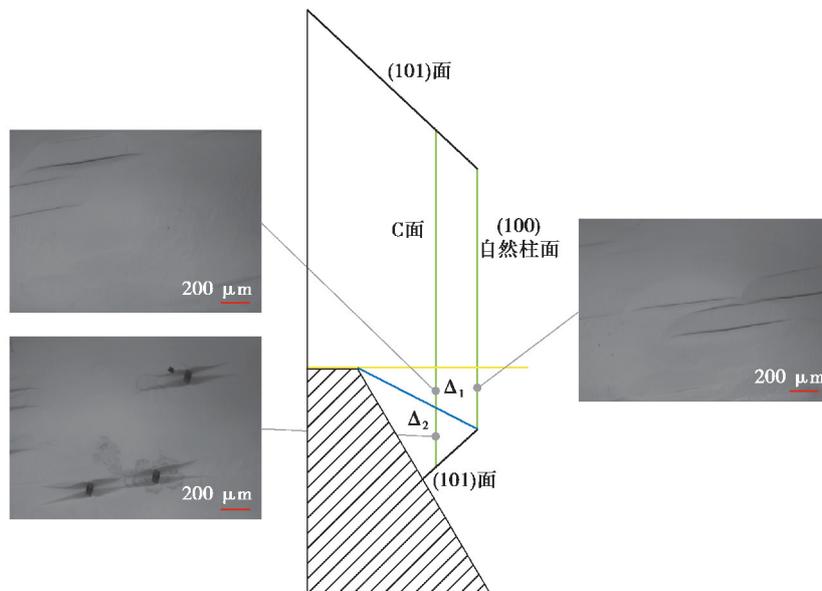


图 8 仅 $(10\bar{1})$ 面存在时 (100) 柱面的腐蚀结果

Fig. 8 Etch results of (100) section when only $(10\bar{1})$ faces exist

当出现 $(\bar{1}0\bar{1})$ 面时,粗黄线以下区域腐蚀情况如图 9 所示,图中蓝线为生长界面,上方蓝线为柱-锥界面,下方蓝线为锥-锥界面,粗黄线以下,上方蓝线以上为 (100) 面生长扇区(Δ_1 区域),两蓝线之间为 $(10\bar{1})$ 面生长扇区(Δ_2 区域),托盘锥面以上,下方蓝线以下为 $(\bar{1}0\bar{1})$ 面生长扇区(Δ_3 区域)。自然柱面的情况与只存在 $(10\bar{1})$ 面时的自然柱面相似,几乎没有发现位错坑,同时包含 (100) 、 $(10\bar{1})$ 扇区的截面(D截面)腐蚀的位错密度也几乎为零,这与只出现 $(10\bar{1})$ 面时包含相同生长扇区的腐蚀情况出现了明显差异。包含 (100) 、 $(10\bar{1})$ 、 $(\bar{1}0\bar{1})$ 扇区的截面(E截面)则只在靠下边缘很窄的范围内(出现位置距边缘约 1~2 mm)发现了位错。对比图 9 D 截面与图 8 C 截面,虽然二者包含的生长扇区相同,但图 9 的 Δ_2 区域不与托盘相接触,位错极少,图 8 的 Δ_2 区域与托盘接触,存在不少位错。对比图 9 的 E 截面与图 8 的 C 截面,虽然二者包含生长扇区不同,但最底部生长扇区都与托盘直接接触,它们的位错都出现在截面下方区域,只是图 9 中 E 截面位错的分布范围较窄,图 8 的 C 截面位错分布范围则较宽,这与 Δ_3 、 Δ_2 区域在 (100) 截面中出现的范围大致相当。

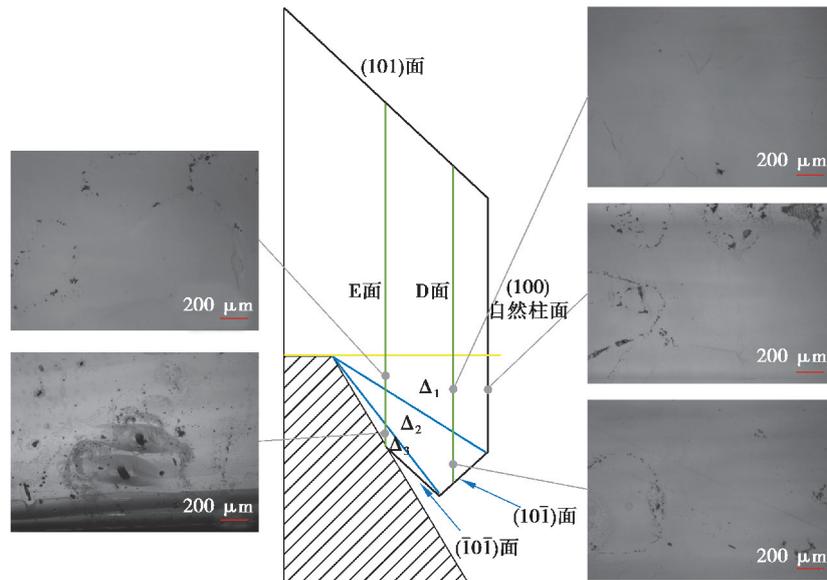


图 9 $(\bar{1}0\bar{1})$ 面存在时 (100) 柱面的腐蚀结果

Fig. 9 Etch results of (100) section when $(\bar{1}0\bar{1})$ faces exist

锥台托盘生长晶体下半部分的位错腐蚀表明,下半部分的柱面普遍具有良好的生长质量,位错缺陷较少。位错主要集中在与锥台斜面直接接触的生长扇区(图 8 的 Δ_2 区域,图 9 的 Δ_3 区域),该生长扇区较差的流场条,加上与托盘表面直接接触共同作用使得这一部分晶体存在较多位错,而不与托盘直接接触的晶面生长条件得到改善,不易产生位错等缺陷(图 8 的 Δ_1 区域,图 9 的 Δ_1 、 Δ_2 区域及下半部分柱面)。此外,还发现最底层生长区的位错缺陷并没有扩散至其他生长区。因此,锥台法生长额外增加的下半部分晶体有望能用于实际,这无疑提高了晶体的产出率。

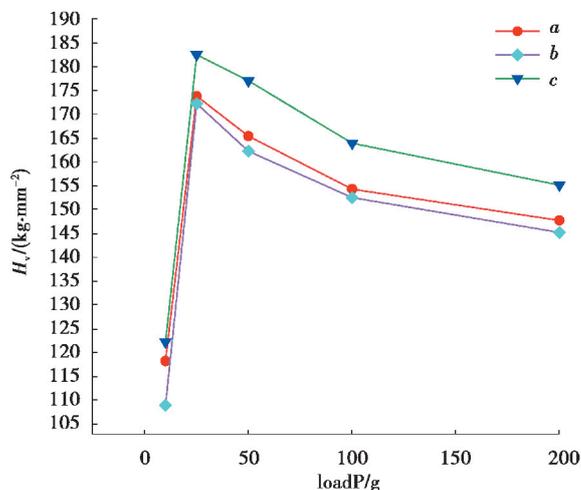
2.2 硬度分析

硬度是晶体在面对外部刮擦压痕引起塑性形变时的抵抗力,硬度的高低反映了结晶质量的好坏^[23]。在工业应用中,晶体需要良好的力学性能满足设备加工的需要。通常晶体硬度除了受到形成热、晶格内能、德拜温度、原子间距等基本因素影响,晶体生长过程中的缺陷(位错、空穴、包裹物等)也是硬度变化的重要原因^[24]。垂直于 a 轴切割得到样品,尺寸大小 $10\text{ mm}\times 12\text{ mm}\times 15\text{ mm}$,其硬度值根据下列公式计算得到:

$$H_v = 1.854 \frac{4P}{d^2}$$

其中: H_v 为显微硬度值, $\text{kg}\cdot\text{mm}^2$; P 为施加载荷值, g ; 载荷依次为 10 g , 25 g , 50 g , 100 g , 200 g ; d 为压痕的对角线长度, mm ,通过硬度计上的显微标尺测得。实验中为保证数据的准确性每个载荷重复实验 3 次以上取平均值。

所得数据如图 10 所示,在同样降温速度、转速条件下,相比于锥台法,平托盘生长晶体的硬度值较低,这与使用平托盘生长晶体时,柱面底部始终存在的低过饱和度区易形成台阶失稳产生包裹物诱发位错等缺陷,最终降低此处的结晶完整性有关。而对 2 种不同转速的锥台托盘生长晶体,80 r/min 下晶体硬度得到了较大的提高,这是因为高转速下整个晶面的边界层变薄,过饱和度均匀性增加,加强了整体的溶质供应,锥台的引入改善了局部的流场条件,2 种因素共同作用增强了晶体硬度,提高了晶体的结晶完整性。



注:曲线 *b* 为平托盘生长晶体,转速为 45 r/min;曲线 *a*、*c* 为锥台托盘生长晶体,转速分别为 45 r/min、80 r/min。

图 10 晶体硬度随载荷的变化

Fig. 10 The variation of crystal hardness with load

3 结 论

使用锥台托盘柱面双向拓展,增加了柱区晶体可使用体积,位错观察结果表明:

- 1) 使用同种类型籽晶时,锥台托盘生长晶体上半部分的总体位错分布与平托盘生长晶体的位错分布相似,局部位错数目更少,硬度分析也显示该区域的晶体质量更好。
- 2) 锥台托盘生长晶体下半部分柱面的位错缺陷很少,生长质量良好。
- 3) 锥台托盘生长晶体下半部分与锥台斜面接触的锥面晶体存在位错,正是这一部分晶体的存在阻隔了其他部分与托盘的直接接触,使得未接触部分生长条件得到改善。

参考文献:

- [1] 邵建达,戴亚平,许乔. 惯性约束聚变激光驱动装置用光学元器件的研究进展[J]. 光学精密工程, 2016, 24(12): 2889-2895.
Shao J D, Dai Y P, Xu Q. Progress on optical components for ICF laser facility[J]. Optics and Precision Engineering, 2016, 24(12): 2889-2895.(in Chinese)
- [2] Zaitseva N, Carman L. Rapid growth of KDP-type crystals[J]. Progress in Crystal Growth and Characterization of Materials, 2001, 43(1): 1-118.
- [3] 丁建旭,王圣来,牟晓明,等. KDP 晶体(100)面生长台阶聚并现象的 AFM 研究[J]. 无机材料学报, 2010, 25(11): 1191-1194.
Ding J X, Wang S L, Mu X M, et al. AFM investigation on step bunching on (100) face of KDP crystal[J]. Journal of Inorganic Materials, 2010, 25(11): 1191-1194.(in Chinese)
- [4] van Enckevort W J P, Rosmalen R J V, Klapper H, et al. Growth phenomena of KDP crystals in relation to the internal structure[J]. Journal of Crystal Growth, 1982, 60(1): 67-78.
- [5] Zaitseva N, Carman L, Smolsky I. Habit control during rapid growth of KDP and DKDP crystals[J]. Journal of Crystal Growth, 2002, 241(3): 363-373.
- [6] Dhanaraj G, Byrappa K, Prasad V, et al. Springer handbook of crystal growth[J]. Japanese Magazine of Mineralogical and

- Petrological Sciences, 2010, 39(5): 193a.
- [7] Endert H, Melle W. Influence of dislocations in KDP crystals on laser damage threshold[J]. Kristall Und Technik, 1981, 16(7): 815-819.
- [8] 汪剑成, 苏根博, 郑国宗, 等. 溶液连续过滤快速生长 KDP 晶体及其品质分析[J]. 人工晶体学报, 2010, 39(1): 1-4.
Wang J C, Su G B, Zheng G Z, et al. Continuous filtration system for rapid growth and quality analysis of KDP crystals [J]. Journal of Synthetic Crystals, 2010, 39(1): 1-4.(in Chinese)
- [9] Lutsau V G, Fishman J M, Res I S. X-ray diffraction topography study of defects in potassium dihydrogen phosphate (KDP) and ammonium dihydrogen phosphate (ADP) single crystals[J]. Kristall Und Technik, 1970, 5(3): 445-458.
- [10] Sangwal K, Szurgot M, Karniewicz J, et al. On the selective etching of KDP crystals[J]. Journal of Crystal Growth, 1982, 58(1): 261-266.
- [11] Belouet C. Growth and characterization of single crystals of KDP family [J]. Progress in Crystal Growth and Characterization, 1980, 3(2/3): 121-156.
- [12] Klapper H, Fishman Y M, Lutsau V G. Elastic energy and line directions of grown-in dislocations in KDP crystals [J]. Physica Status Solidi (a), 1974, 21(1): 115-121.
- [13] 乔景文, 邓珮珍, 钱振英, 等. KDP 晶体质量及缺陷的研究[J]. 人工晶体, 1987, 16(2): 134-141.
Qiao J W, Deng P Z, Qian Z Y, et al. Investigation on the quality and defects of kdp crystals[J]. Journal of Synthetic Crystals, 1987, 16(2): 134-141.(in Chinese)
- [14] 陈金长, 黄依森, 魏培才. KDP 晶体中位错的研究[J]. 物理学报, 1985, 34(3): 377-380, 429.
Chen J C, Huang Y S, Wei P C. Dislocations in potassium dihydrogen phosphate (kdp) crystals[J]. Acta Physica Sinica, 1985, 34(3): 377-380, 429.(in Chinese)
- [15] 黄依森, 赵庆兰, 曾金波. 大截面 KDP 晶体的生长与位错的检测[J]. 硅酸盐学报, 1990, 18(2): 158-164.
Huang Y S, Zhao Q L, Zeng J B. The growth and dislocation examination of kdp crystals with large cross section [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 1990, 18(2): 158-164.(in Chinese)
- [16] 鲁晓东, 滕冰, 李晓兵, 等. 点状籽晶法生长 KDP 晶体的(100)面位错分布[J]. 青岛大学学报(自然科学版), 2007, 20(1): 38-41.
Lu X D, Teng B, Li X B, et al. Distribution of dislocation on(100) crystal face of KDP crystals growth from point-seed [J]. Journal of Qingdao University (Natural Science Edition), 2007, 20(1): 38-41.(in Chinese)
- [17] 钟德高, 滕冰, 张国辉, 等. pH 值对 KDP 晶体位错结构的影响[J]. 人工晶体学报, 2007, 36(3): 501-506.
Zhong D G, Teng B, Zhang G H, et al. Influence of pH value on dislocation structure of KDP crystal[J]. Journal of Synthetic Crystals, 2007, 36(3): 501-506.(in Chinese)
- [18] Teng B, Zhong D G, Cao L F, et al. Synchrotron-radiation X-ray topography of the rapid grown KDP crystals[J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 320: 325-328.
- [19] Bordui P F, Motakef S. Hydrodynamic control of solution inclusion during crystal growth of KTiOPO_4 (KTP) from high-temperature solution[J]. Journal of Crystal Growth, 1989, 96(2): 405-412.
- [20] Yeckel A, Zhou Y M, Dennis M, et al. Three-dimensional computations of solution hydrodynamics during the growth of potassium dihydrogen phosphate: II. Spin down[J]. Journal of Crystal Growth, 1998, 191(1/2): 206-224.
- [21] Robey H F. Numerical simulation of the hydrodynamics and mass transfer in the large scale, rapid growth of KDP crystals—2: computation of the mass transfer[J]. Journal of Crystal Growth, 2003, 259(4): 388-403.
- [22] Wang P F, Li M W, Liu H. Numerical simulation of the hydrodynamics and mass transfer in the growth of KH_2PO_4 crystal through a frustum platform[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2019, 138: 553-561.
- [23] Rajesh P, Ramasamy P. Growth of dl-malic acid-doped ammonium dihydrogen phosphate crystal and its characterization [J]. Journal of Crystal Growth, 2009, 311(13): 3491-3497.
- [24] Anis M, Muley G G. Bulk growth of undoped and Nd^{3+} doped zinc thiourea chloride (ZTC) monocrystal: exploring the remarkably enhanced structural, optical, electrical and mechanical performance of Nd^{3+} doped ZTC crystal for NLO device applications[J]. Optics & Laser Technology, 2017, 90: 190-196.