

基于视觉辐条图案识别方法的蓝宝石引晶机制研究

Chen, Chen; Qiao, Tiezhu; Pang, Yusong; Hao, Guirong

Publication date

2022

Document Version

Final published version

Published in

Rengong Jingti Xuebao/Journal of Synthetic Crystals

Citation (APA)

Chen, C., Qiao, T., Pang, Y., & Hao, G. (2022). 基于视觉辐条图案识别方法的蓝宝石引晶机制研究. *Rengong Jingti Xuebao/Journal of Synthetic Crystals*, 51(2), 256-262.

Important note

To cite this publication, please use the final published version (if applicable).
Please check the document version above.

Copyright

Other than for strictly personal use, it is not permitted to download, forward or distribute the text or part of it, without the consent of the author(s) and/or copyright holder(s), unless the work is under an open content license such as Creative Commons.

Takedown policy

Please contact us and provide details if you believe this document breaches copyrights.
We will remove access to the work immediately and investigate your claim.

Green Open Access added to TU Delft Institutional Repository

'You share, we take care!' - Taverne project

<https://www.openaccess.nl/en/you-share-we-take-care>

Otherwise as indicated in the copyright section: the publisher is the copyright holder of this work and the author uses the Dutch legislation to make this work public.

基于视觉辐条图案识别方法的蓝宝石引晶机制研究

陈晨^{1,2}, 乔铁柱^{1,2}, 庞宇松³, 郝贵荣⁴

(1. 太原理工大学新型传感器与智能控制教育部重点实验室, 太原 030024; 2. 太原理工大学物理与光电工程学院, 太原 030024;
3. 代尔夫特理工大学机械海运与材料工程学院, 荷兰代尔夫特 2600; 4. 山西中聚晶科半导体有限公司, 晋中 030600)

摘要:工业生产蓝宝石晶体过程中,引晶步骤有着至关重要的地位。引晶必须在温度梯度较小,温度分布趋于稳定的条件下进行。目前,工业生产蓝宝石主要依靠人工经验操控籽晶杆实现引晶操作,但是人工引晶操作的准确性不高会导致成品品质不佳、资源浪费。为此,本文提出一种基于蓝宝石视觉辐条图案识别方法来检测蓝宝石熔体状态自由液面状态,从而实现一种高效率引晶的机制。此方法利用经典骨架化算法细化辐条图案, Harris算子实现特征信息的提取,提取的特征信息放入运动轨迹模型中判断熔体稳定性,分析液面温度分布稳定性从而实现引晶。结果表明,此算法具有有效性,蓝宝石晶体引晶效率大大提高,生产出的成品良率也有提升,可有效指导蓝宝石的工业生产。

关键词:蓝宝石;引晶;温度梯度;辐条图案;图案识别;运动轨迹;骨架化算法;特征信息

中图分类号:O786;TP391.4

文献标志码:A

文章编号:1000-985X(2022)02-0256-07

Sapphire Seeding Mechanism Based on Visual Spoke Pattern Recognition Method

CHEN Chen^{1,2}, QIAO Tiezhu^{1,2}, PANG Yusong³, HAO Guirong⁴

(1. Key Laboratory of Advanced Transducers and Intelligent Control System, Ministry of Education, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China; 2. College of Physics and Optoelectronics, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China; 3. Section of Transport Engineering and Logistic, Faculty of Mechanical, Maritime and Materials Engineering, Delft University of Technology, Delft 2600, The Kingdom of the Netherlands; 4. Shanxi Zhongyujingke Semiconductor Co., Ltd., Jinzhong 030600, China)

Abstract: In the process of industrial production of sapphire crystals, the seeding step plays a vital role. Seeding needs to be performed under conditions where the temperature gradient is small and the temperature distribution tends to be stable. At present, the industrial production of sapphire mainly relies on manual experience to control the seed rod to achieve the crystal pilot operation, but the low accuracy of manual pilot operation will lead to poor quality of finished products and waste of resources. Therefore, this paper proposes a method based on sapphire visual spokes pattern recognition method to detect the free liquid surface state of sapphire melt, so as to realize an efficient crystal induction mechanism. In this method, classic skeletonization algorithm was used to refine the spoke pattern, and Harris operator was used to extract the characteristic information. The extracted characteristic information was put into the motion trajectory model to judge the stability of the melt, and the stability of the temperature distribution of the liquid surface was analyzed to achieve crystal induction. Experimental results show that this algorithm is effective, the efficiency of sapphire crystal seeding is greatly improved, and the yield of the finished product is also improved, which can effectively guide the industrial production of sapphire.

Key words: sapphire; seeding; temperature gradient; spoke pattern; pattern recognition; motion trace; skeletonization algorithm; feature information

0 引言

蓝宝石晶体作为一种理想的晶体材料,具有优越的光学与化学性能^[1],被广泛应用到航空、军事、智能

收稿日期:2021-10-08

基金项目:国家自然科学基金(U1810121);山西省中央引导地方科技发展资金项目(YDZX20201400001796)

作者简介:陈晨(1997—),女,四川人,硕士研究生。E-mail:chenchen0868@link.tyut.edu.cn

通信作者:乔铁柱,博士,教授。E-mail:qiaotiezhu@tyut.edu.cn

制造等高科技领域。目前工业生产蓝宝石晶体的方法主要有热交换法、提拉法和泡生法。其中泡生法以内部温度梯度小^[2]、轴向热应力小、晶体与坩埚不接触、工艺成熟等优点被广泛应用到工业生产中。泡生法蓝宝石生产过程主要分为加热原料→引晶→放肩→等径生长→收尾^[3]五个步骤。完整的生产流程为将原料加热到2 050 ℃,等待合适时间熔体自由液面温度梯度较小时,籽晶杆下摇实现引晶,此时晶体开始径向生长实现放肩。当晶体径向生长到与坩埚壁距离10 mm时,因为缺乏熔体补充会开始轴向等径生长^[4]。其中,在实现引晶操作后,由于操作不当或者引晶时机不对会导致成品缺陷,例如:晶体形变、晶体高密度错位、晶体形成小角晶角、晶体后期开裂、肩部气泡^[5]等问题。因此在整个蓝宝石生长过程中引晶起着至关重要的作用^[6]。

近年来,为了实现更准确引晶,研究人员针对蓝宝石晶体引晶过程开展了许多研究。Timofeev等^[7]提出对于使用直接数字模拟方法,控制蓝宝石生长的影响参数,发现不同强度的马兰戈尼效应、浮力会对熔体造成不同影响,自由液面温度在不同参数情况下呈现不同分布;在模拟研究基础上,研究人员使用视觉检测方法分析液面辐条图案来判断温度分布情况来实现引晶。Kim等^[8]针对蓝宝石泡生法接种过程产生辐射条纹,利用图像处理技术开发出自动播种过程,此方法是首次提出使用视觉检测方法对蓝宝石接种过程进行分析;Yu等^[9]针对蓝宝石泡生法接种点研究提出OCS方法,利用蓝宝石接种时在熔体自由表面产生辐射条纹,分析熔体流动速度与距离,确定最佳接种点,但是在接种过程中,可能出现接种点位置非籽晶杆接触位置的情况,造成理论算法与实际接种条件不相符合;毛颖杰等^[10]通过改良Canny算法,提取动态纹理在籽晶杆下降过程中的特征信息,根据特征信息判断鲁棒性,寻找合适时间引晶;Liu等^[11]针对蓝宝石泡生法利用图像处理技术对最佳种子状态检测提出MIVD方法,利用熔体轴向和径向温度梯度,根据Fréchet距离判断熔体运动的变化以实现接种,但是可能出现接种点已出现,而籽晶杆还未接触到自由液面的现象。上述方法本质上对于引晶状态识别都是通过自由液面的特征来判断热场,当热场稳定时,引晶的操作才是被允许的。

因此本文提出了根据径向温度梯度分析自由液面运动特征来研究引晶状态的识别方法。当径向温度梯度小并且温度趋于稳定时,液面流动是一种对称的向心运动,此时液面受到熔体对流与马兰戈尼效应等因素影响,辐条图案是从长晶炉边缘向中心汇聚,此时汇聚点为冷心,并且在轴向温度梯度作用下,熔体对流下沉的位置就处于长晶炉中心,当两点重合时符合引晶条件。以上述理论为基础,提出根据辐条图案运动轨迹检测算法。此算法在经典Zhang骨架化算法提取自由液面辐条图案的特征信息基础上,利用自由液面辐条图案运动轨迹趋势分析温度梯度大小,判断引晶时机。相较于其他方法,首次提出根据运动模型判断自由液面运动稳定性方法,提高了引晶时刻判断的准确性。

1 辐条图案运动轨迹检测算法

1.1 图像特征点获取

实验图像由工业摄像机获得,摄像机位置摆放在长晶炉观察窗旁边。获取的原始图像中存在大量干扰信息,需要对图像进行预处理。首先将图像灰度处理。由于蓝宝石熔体内部温度高达2 050 ℃,采集图像存在过曝且观察窗口太小,首先选择遮罩方法覆盖图像中无用区域,留下拍摄区域中存在亮度的辐条图案ROI区域,遮罩图片通过二值化^[12]得到:

$$h(x,y) = \begin{cases} 255, & f(x,y) \leq C \\ 0, & f(x,y) \geq C \end{cases} \quad (1)$$

式中: $h(x,y)$ 代表遮罩图片的灰度值; $f(x,y)$ 代表输入图像灰度值; C 为常数,此处 C 值为100。

获得ROI区域后的图像只存在光亮部分,此时将ROI区域转换为二进制图像,将辐条图案与熔体自由表面其他部分区分,增强辐条图案的特征;此处使用自适应二值化算法^[13]实现,其原则如下:

$$g(x,y) = \begin{cases} 255, & f(x,y) \leq T \\ 0, & f(x,y) \geq T \end{cases} \quad (2)$$

式中: $f(x,y)$ 为阈值前的灰度图像; $g(x,y)$ 为分割后的像素灰度; T 是局部自适应阈值。二值化后的图像存在大量干扰特征,需要去噪操作消除干扰;本文结合形态学^[14]中的膨胀^[15]、腐蚀^[16]操作,利用开运算与闭运算^[13]消除干扰信息,膨胀腐蚀原理如下:

$$A \ominus B = \{z | (B)_z \subset A\} \quad (3)$$

$$A \oplus B = \{z | (B)_z \cap A \neq \phi\} \quad (4)$$

式中: A 代表结构元素; B 代表原图像。去噪后的图像中存在干扰信息——籽晶杆倒影的特征信息, 此特征信息在自由液面有较强的对比度, 会影响到运动特征点的提取。由于在图像采集的过程中, 摄像机位置保持不变, 因此在实现接种前籽晶杆倒影位置不发生改变, 始终固定在左下角位置, 为了便于运动特征点提取, 选择遮罩方法覆盖图像中的籽晶杆倒影区域。

去噪后得到轮廓清晰的辐条图案, 但是为了最大限度地保留了辐条图案的结构特征, 需要使用骨架化算法细化运动图像轮廓。此处使用经典 Zhang 等^[17]的骨架化算法, 具体如下: 查找白色像素点中心的 8 个邻域, 使用一个 3×3 的矩阵 m 来演示:

$$m = \begin{pmatrix} P_9 & P_2 & P_3 \\ P_8 & P_1 & P_4 \\ P_7 & P_6 & P_5 \end{pmatrix} \quad (5)$$

P_1 表示为中心像素点。如果像素满足下面四点要求, 那么标记该像素为待删除点:

$$2 \leq N(P_1) \leq 6 \quad (6)$$

$$A(P_1) = 1 \quad (7)$$

$$P_2 \times P_4 \times P_6 = 0 \quad (8)$$

$$P_4 \times P_6 \times P_8 = 0 \quad (9)$$

式中: $N(P)$ 表示 P 像素 8 邻域内黑色像素的数目; $A(P)$ 表示 P 像素 8 邻域内按顺时针顺序前后两像素分别为黑白像素的对数。如果不满足上述条件, 则再次对像素进行判断, 判断条件前两个条件与 (6)、(7) 相同, 另外两个条件为:

$$P_2 \times P_4 \times P_8 = 0 \quad (10)$$

$$P_2 \times P_6 \times P_8 = 0 \quad (11)$$

当像素点满足上述条件时, 则该像素被标记为待删除点。等到图像中所有白色像素完成判断后, 将所有待删除点删除。

细化后的图像运动轮廓已经非常明显, 再使用 Harris 角点检测^[18]提取骨架图案的特征点信息, 其原理如下:

$$E(u, v) = \sum_{x, y} w(x, y) [I(x+u, y+v) - I(x, y)]^2 \quad (12)$$

式中: $w(x, y)$ 代表滑动窗口权重函数; $E(u, v)$ 表示窗口向各个方向移动时像素值衡量系数的变化。此式展开可以得到:

$$E(u, v) \approx [u \quad v] M \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} \quad (13)$$

其中, M 是 harris 角点的梯度协方差矩阵:

$$M = \sum_{x, y} w(x, y) \begin{bmatrix} I_x I_x & I_x I_y \\ I_x I_y & I_y I_y \end{bmatrix} \quad (14)$$

式中: I_x, I_y 为 x, y 方向的梯度。图像处理结果如图 1 所示。

1.2 辐条图案运动轨迹跟踪

角点处理后的辐条图案得到了轨迹运动中的特征信息, 特征信息放入栈中存放保存。此处根据熔炉制造原理, 熔炉中心理论上为熔炉内部最稳定、温度状态最低的位置, 在此处接种可以减少蓝宝石生成过程中产生的热应力^[19-20]。因此根据籽晶杆在自由液面倒影获取坩埚中心点位置 P , 标志此处位置为坐标原点。获取的角点信息根据公式 (15) 处理, 相邻两个特征点对应长晶炉中心的角度为 φ_{ij} 。每个 A 数据中存放两个参数: 角度信息 φ_{ij} 与时间信息 t :

$$A_{ij} = \{\varphi_{ij}, t\} = \left\{ \arccos\left(\frac{l_i^2 + l_j^2 - l_{ij}^2}{2l_i l_j}\right), t \right\} \quad (15)$$

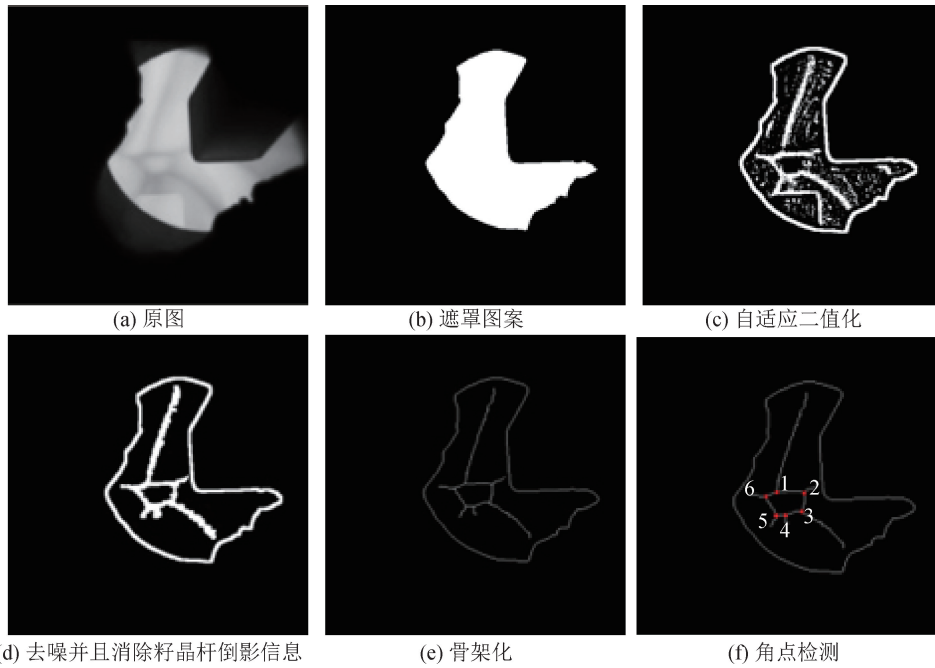


图 1 图像处理后的辐条图案

Fig.1 Spoke pattern after image processing

式中: i 代表第 i 个角点; j 代表第 j 个角点(其中 i 与 j 为两相邻角点); l_i 代表 i 角点与坐标原点的距离; l_j 代表 j 角点与坐标原点的距离; $l_i l_j$ 代表 i, j 两角点之间的距离; 在辐条图案运动过程中连续采集 60 帧数据, 将处理后的信息放入一个 $m * T$ 数组 S 中, 数组表现形式为:

$$S = \begin{pmatrix} A_{12T_0} & \cdots & A_{12T_{T-1}} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ A_{m1T_0} & \cdots & A_{m1T_{T-1}} \end{pmatrix} \quad (16)$$

式中: m 代表角点信息个数; T 表示连续采集的图像帧数。数组集成过程中, 对每一帧图像进行稳定性判断, 计算当前帧数据的离散程度:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (A_{i2T_0} - \bar{A})^2}{m}} < \mu \quad (17)$$

式中: μ 为稳定函数最大阈值, 设置为 1。每一帧图像输入此模型, 其离散程度小于 μ 值, 则认定此时离散程度符合运动要求, 继续采集处理下一帧图像; 否则清空之前帧数据, 重新在辐条图案出现时获取新一轮运动轨迹; 每一帧图像都符合离散程度条件, 则对生成的 S 数组进行稳定性判断, 同一角点度数迭代计算:

$$\Delta \varphi_i(t) = \varphi_i(t) - \varphi_i(t - 1) \quad (18)$$

$$\sigma_1 = \frac{1}{1 + \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^T (\Delta \varphi_i(t) - \Delta \bar{\varphi})^2}{T}}} \quad (19)$$

式中: $\Delta \varphi$ 代表相邻两帧角度差值。当 σ_1 趋近于 1 时, 证明同一角度运行轨迹处于稳定状态; 如果符合上述双重验证, 则证明此次辐条图案运动状态稳定, 此时自由液面温度梯度较小, 温度处于相对稳定状态, 可以进行籽晶杆下降实现引晶。图 2 为 6 个特征点在运动过程中角度变化情况, 其中横坐标对应图像采集帧数, 纵坐标角度对应坩埚中心点对应的两个特征角点的角度, 纵坐标角度数据随着输入数据增多逐渐收敛并且最终趋近于 60° , 符合模型对六个特征点判断稳定性的要求, 代表此时液面运动状况稳定, 自由液面温度梯度小, 可以进行引晶操作。

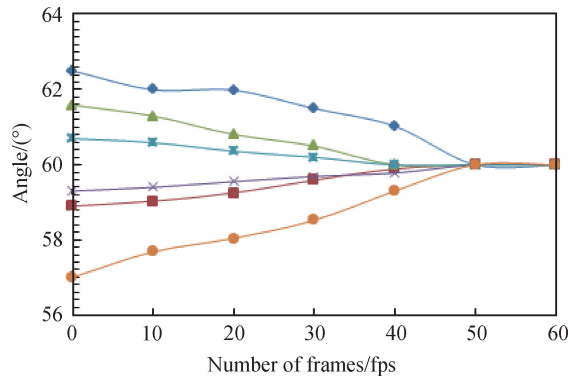


图 2 特征点运动轨迹

Fig. 2 Feature point movement trace

2 实验结果对比与分析

2.1 实验装置与流程

引晶实验在蓝宝石生产工厂完成,该实验装置主要包括工业 CCD、透镜、隔热板、计算机、种子棒和它的控制器。实验装备示意图如图 3 所示,在用泡生法生长蓝宝石晶体的实验中,根据对生长功率进行历史分析,实验设定了初始熔化功率约为 68 000 W。原料完全熔化后,下调功率,功率下调范围约为 100 ~ 300 W。控制种子晶体靠近表面,通过观测种子形状图像调节热功率,调节水平约为 0 ~ 100 W。种子形状在温度不同时呈现两种现象:温度过高时,晶种会被熔化;温度过低时引晶,晶种上面会附着悬浮物,影响晶体正常生长。因此可以通过功率与种子状态联合分析,获得温度的精确近似。辐条图案运动轨迹检测算法的实验流程图如图 4 所示,CCD 采集连续自由液面图像信息,首先对图像进行预处理,将预处理后得到运动特征点信息放入稳定性判断模型中,如果符合模型收敛条件,则液面温度梯度小,熔体流动稳定,适合引晶操作,反之则清空信息重新获取新的辐条图案信息。

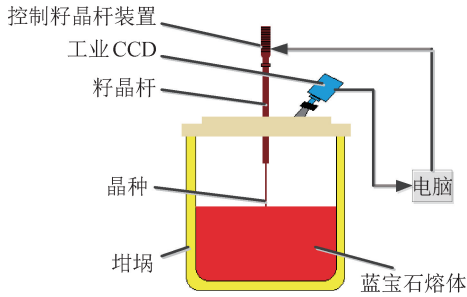


图 3 实验装备示意图

Fig. 3 Schematic diagram of experimental equipment

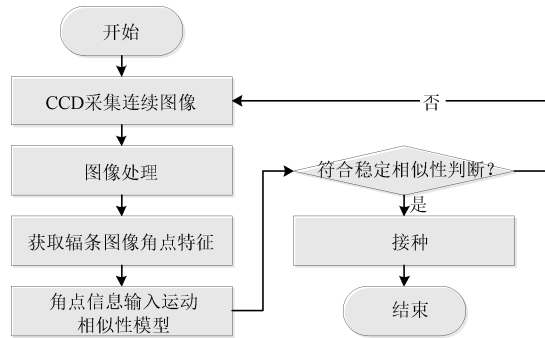


图 4 实验流程图

Fig. 4 Experimental flowchart

2.2 实验对比与分析

对比实验选择三种方法,实验组辐条图案运动轨迹分析方法,对照组 a: MIVD 方法;对照组 b: 传统人工接种方法。实验过程中,为了避免实验误差过大,实验中使用三个相同规格的长晶炉(长晶炉 1 ~ 3),控制生长环境相同、原料堆相同,来达到近似相同的热场。实验时等待原料完全融化后,这三种方法分别在三个单独的坩埚内重复试验,每组重复 15 次。试验完成后每组都会得到 45 份数据。

实验结果将从接种失败的次数与最终生成的成品优良状态两方面分析。接种失败判断是:蓝宝石生长阶段在完成引晶操作后,来到生长阶段的放肩阶段,此时晶体径向生长,从观察窗观测表面应该是一个完美的圆形。当晶体生长不是等径圆则判断为接种失败,反之接种成功;生成的成品分为三个等级:优秀成品、一般成品、劣质成品,三种等级的晶体视图如图 5 所示。优秀成品质量为标准梨形状;一般成品与优秀质量存

在差距,不是标准梨形,但是成品完整无破裂;劣质成品则存在开裂等现象。实验对比分析如表1所示,实验数据证明,本文提出的方法完成接种后得到的优秀晶体质量均远高于其余两种方法,高达84%,比MIVD方法提高了13%、人工接种方法提高了28%;同时,对比引晶失败次数,本文提出的方法接种失败次数只有27次,远低于其他两种方法的47次、55次。与MIVD方法相比,本方法补足了由于热作用力情况下导致晶体播种时受力不均匀产生的畸形,同时也提高了效率;相比于人工接种方法,本方法避免了人为多次接种破坏晶种原子排序导致的晶体缺陷,也降低工作人员工作强度。在实际生产中,本文提出的方法不仅提高了晶体质量也节约了时间成本。

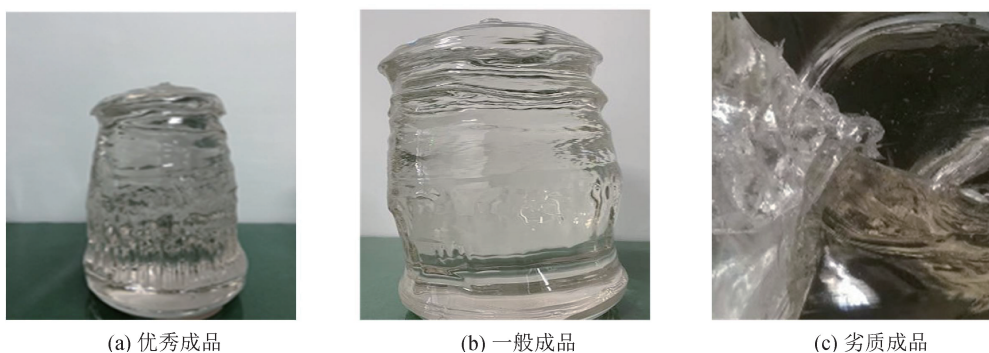


图5 成品等级

Fig. 5 Product grade

表1 实验结果对比

Table 1 Comparison of experimental results

	Tracking method	MIVD method	Artificial method
Excellent quality	38	32	27
Ordinary quality	5	7	6
Inferior quality	2	6	10
Proportion of excellent quality	84%	71%	56%
Number of seeding failures	27	47	55

3 结 论

本文针对蓝宝石晶体生产过程中引晶准确性低、成品良率不高的问题,提出基于视觉辐条图案识别的引晶方法,根据自由液面辐条图案变化情况,判断熔体是否处于自由液面温度梯度较小,温度趋于稳定的时刻。利用图像处理对自由液面辐条图案进行特征提取,并且首次引入运动相似稳定性检测辐条图案变化的情况,形成基于自由液面辐条图案运动轨迹分析的检测方法。通过实验证明,此方法有较好的熔体稳定状态检测能力,同时可实现实时跟踪自由液面汇聚过程,可有效指导蓝宝石的工业生产。

参 考 文 献

- [1] 于海群. 底部保温结构对大尺寸蓝宝石晶体生长影响的数值模拟及实验研究[J]. 材料导报, 2019, 33(S1): 37-40.
YU H Q. Simulation and experimental research on the effect of bottom shield structure on the large-size sapphire crystal growth[J]. Materials Reports, 2019, 33(S1): 37-40(in Chinese).
- [2] KHATTAK C P, SHETTY R, SCHWERTDFEGER C R, et al. World's largest sapphire for many applications[J]. Journal of Crystal Growth, 2016, 452: 44-48.
- [3] 刘方方, 左然, 苏文佳. 泡生法蓝宝石单晶不同生长阶段的数值模拟研究[J]. 人工晶体学报, 2015, 44(10): 2898-2902.
LIU F F, ZUO R, SU W J. Study on different growth stages of KY sapphire crystal by numerical simulation[J]. Journal of Synthetic Crystals, 2015, 44(10): 2898-2902(in Chinese).
- [4] 刘丽君, 徐家庆, 蔡兴民. 泡生法蓝宝石晶体生长工艺的探讨[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2011, 43(3): 145-148.
LIU L J, XU J Q, CAI X M. Research on the sapphire mono-crystal growth technique by Kyropoulos method[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2011, 43(3): 145-148(in Chinese).

- [5] YANG X, QIAO T, ZHANG H, et al. Research on image recognition and detection method of sapphire bubbles[J]. *Journal of Instrumentation*, 2019, 14(12): P12013.
- [6] 陈晨, 陈洪建, 于海群, 等. 引晶直径对泡生法蓝宝石晶体位错及小角度晶界影响的研究[J]. *人工晶体学报*, 2013, 42(12): 2556-2561.
CHEN C, CHEN H J, YU H Q, et al. Study on effect of necking diameter on dislocation and low-angle grain boundary of sapphire crystal grown by Kyropoulos method[J]. *Journal of Synthetic Crystals*, 2013, 42(12): 2556-2561 (in Chinese).
- [7] TIMOFEEV V V, KALAEV V V, IVANOV V G. 3D melt convection in sapphire crystal growth: evaluation of physical properties[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2015, 87: 42-48.
- [8] KIM C, KIM S, AHN J. Development of auto-seeding system using image processing technology in the sapphire crystal growth process via the Kyropoulos method[J]. *Applied Sciences*, 2017, 7(4): 371.
- [9] YU B C, QIAO T Z, ZHANG H T, et al. The OCS method of seeding point detection using visible vision for large-diameter sapphire single crystal growth via the Kyropoulos method[J]. *Measurement*, 2019, 137: 39-48.
- [10] 毛颖杰, 李钰, 王坤, 等. 基于动态纹理分析的蓝宝石熔体状态识别方法[J]. *人工晶体学报*, 2018, 47(4): 687-694.
MAO Y J, LI Y, WANG K, et al. State recognition of the melt in sapphire growth based on dynamic texture analysis[J]. *Journal of Synthetic Crystals*, 2018, 47(4): 687-694 (in Chinese).
- [11] LIU Y, QIAO T Z, YANG Y, et al. The MIVD method of optimal seeding state detection using image processing technology for sapphire crystal growth via the Kyropoulos method[J]. *Measurement*, 2020, 151: 107186.
- [12] 赵世峰, 何哲健. 基于OpenCV的复杂环境下图像二值化方法[J]. *电子测量技术*, 2018, 41(6): 55-59.
ZHAO S F, HE X J. Binarization method for images acquired under complex environment based on OpenCV[J]. *Electronic Measurement Technology*, 2018, 41(6): 55-59 (in Chinese).
- [13] 李艺杰, 邹坤霖, 孙炜, 等. 基于Sauvola算法和神经网络的图像自适应二值化方法[J]. *测控技术*, 2020, 39(8): 62-69 + 75.
LI Y J, ZOU K L, SUN W, et al. Adaptive image binarization method based on sauvola algorithm and neural network[J]. *Measurement & Control Technology*, 2020, 39(8): 62-69 + 75 (in Chinese).
- [14] 苗姣姣, 徐望明. HSV空间和形态学处理相结合的车牌定位方法[J]. *电视技术*, 2015, 39(5): 146-149.
MIAO J J, XU W M. License plate location method based on combination of HSV space and morphology processing[J]. *Video Engineering*, 2015, 39(5): 146-149 (in Chinese).
- [15] 孙继平, 吴冰, 刘晓阳. 基于膨胀/腐蚀运算的神经网络图像预处理方法及其应用研究[J]. *计算机学报*, 2005, 28(6): 985-990.
SUN J P, WU B, LIU X Y. Cellular neural network applying manner in pre-processing image[J]. *Chinese Journal of Computers*, 2005, 28(6): 985-990 (in Chinese).
- [16] 李慧敏, 张之江. 基于模板迭代更新的图像配准算法[J]. *电子测量技术*, 2017, 40(10): 134-138.
LI H M, ZHANG Z J. Iterative updating affine alignment method for image group with little similarities[J]. *Electronic Measurement Technology*, 2017, 40(10): 134-138 (in Chinese).
- [17] ZHANG T Y, SUEN C Y. A fast parallel algorithm for thinning digital patterns[J]. *Communications of the ACM*, 1984, 27(3): 236-239.
- [18] SIKKA P, ASATI A R, SHEKHAR C. Real time FPGA implementation of a high speed and area optimized Harris corner detection algorithm[J]. *Microprocessors and Microsystems*, 2021, 80: 103514.
- [19] 汪传勇, 左然, Andrey Smirnov, 等. 泡生法生长蓝宝石单晶的热场改进与模拟优化[J]. *人工晶体学报*, 2011, 40(1): 83-87.
WANG C Y, ZUO R, SMIRNOV A, et al. Improvement and optimization simulation of the thermal fields in sapphire crystal grown by Kyropoulos method[J]. *Journal of Synthetic Crystals*, 2011, 40(1): 83-87 (in Chinese).
- [20] 王东阳. 泡生法大尺寸蓝宝石单晶生长研究[D]. 深圳: 深圳大学, 2016.
WANG D Y. Kyropoulos method of large-size single-crystal sapphire[D]. Shenzhen: Shenzhen University, 2016 (in Chinese).