

JGD 提拉单晶炉生长控制的智能化

陈川贵,丁雨瞳,龙勇,何晔,张晟,王桥臻,黄馨阅

(中国电子科技集团公司第二十六研究所,重庆 401332)

摘要:激光单晶(JGD)提拉单晶炉是一种上称重自动直径控制激光单晶炉,该单晶炉采用高精密度电子秤作为传感器。JGD 提拉单晶炉控制软件以晶体质量为控制目标,而其他控制软件是以功率或温度为控制目标。该控制软件将晶体理论质量与电子秤实际质量进行比较,形成闭环负反馈,以微分、积分和比例(PID)理论智能控制实现晶体生长。自动控制生长出多种高品质晶体(如 InSb、YAG、LYSO、TGG、Ti:Al₂O₃ 等),生长过程无需人为干预。软件利用 SQLServer 数据库收集生长过程数据,实现大数据分析。结果表明,该软件集成了远程监视功能,可提高生产效率。

关键词:自动化;晶体;温场;数据库;数字化;智能化

中图分类号:TN384;TN305 **文献标识码:**A

Intelligent Growth Control of JGD Single Crystal Furnace

CHEN Chuangui, DING Yuchong, LONG Yong, HE Ye, ZHANG Sheng,

WANG Qiaozhen, HUANG Xinyue

(The 26th Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Chongqing 401332, China)

Abstract: The JGD single crystal furnace is a laser-based single crystal furnace featuring automatic diameter control for weighing. Unlike other single crystal furnaces that use power or temperature as control objectives, this furnace employs high-precision electronic scales as sensors and uses crystal weight as the control objective. The control software of the JGD single crystal furnace innovatively compares the theoretical weight of the crystal with the weight measured by the electronic scales to establish a closed-loop negative feedback system. By applying differential, integral, and PID theory, the software achieves intelligent control of the crystal growth process, automatically managing the growth of various high-quality crystals such as InSb, YAG, LYSO, TGG, and Ti: Al₂O₃ without human intervention. Additionally, the software collects growth process data using an SQLServer database for big data analysis and integrates remote monitoring functions, thereby improving production efficiency.

Key words: automation; crystals; temperature registered; database; digitalization; intelligence

0 引言

提拉法^[1]是晶体生长的一种方式。提拉法是将原料熔于无污染原料的坩埚中,调节功率使温度达到生长要求,将籽晶缓慢插入熔体中,保持籽晶不熔也不长大,此时温度合适,然后缓慢向上提拉和旋转籽晶,同时缓慢降低功率以生长晶体。早期提拉法单晶炉操作人员通过观察晶体光圈亮度来判断温度(或功率)是否适合晶体生长,实现引晶和控制晶体直径。工艺稳定成熟后,工艺人员凭经验在

欧陆表或宇电表中设置温度(或功率)曲线,以控制晶体的形状。晶体的质量高度依赖操作人员的操作控制。

随着社会进步,晶体生长过程要求自动控制,自动控制通常采用闭环控制系统。闭环控制系统是指被控对象的输出(被控制量)反送回来影响控制器的输入,形成一个或多个闭环,即反馈理论。反馈理论主要包括测量、比较和执行。被控变量的实际值是测量的关键,与期望值相比较得到偏差,

收稿日期:2024-03-11

作者简介:陈川贵(1970-),男,重庆市合川区人,高级工程师。

用此偏差纠正系统的控制量,执行调节控制。在实际工程中,应用最广的调节器控制规律为微分、积分和比例(PID^[2])控制。

为了实现提拉法晶体生长自动化,激光单晶(JGD)提拉单晶炉控制软件建立了晶体的数学模型,以晶体直径为控制量,利用 PID 控制原理,实现了晶体生长自动化。并采用大数据方法,利用网络实现集中监控功能,使晶体生长更智能化。

1 晶体数学模型的数字化

JGD 提拉单晶炉控制软件建立的晶体模型,分为 4 段式和任意多段式数学模型。4 段式晶体数学模型中包括籽晶、放肩、等径及收尾,如图 1 所示。

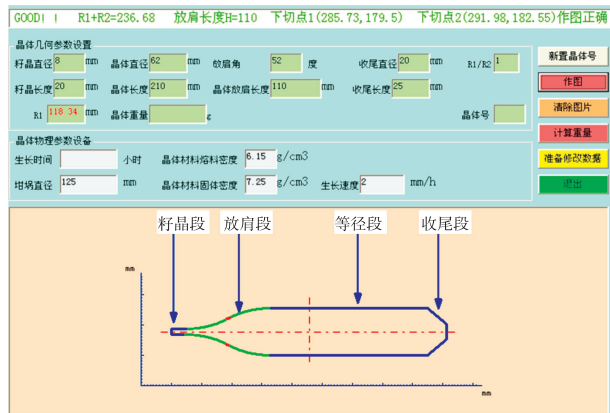


图 1 4 段式晶体数学模型

表 1 为任意多段式(总段数为 6)晶体数学模型的晶体几何参数及曲线类型。图 2 为晶体任意多段式(对应表 1)的数学模型。在兼顾每段间平滑过渡的情况下,可做出理想的晶体数学模型。

表 1 任意多段式晶体几何参数及曲线类型

序号	名称	直径 1/ mm	长度/mm	直径 2/ mm	曲线 类型	指数
1	A	∅8	5	∅6	线性	1
2	A	∅6	30	∅30	Spline	1
3	A	∅30	25	∅50	Spline	1
4	A	∅50	50	∅50	线性	1
5	A	∅50	50	∅10	Spline	1
6	A	∅10	25	∅50	Spline	1

注:软件几何曲线有线性、1st half Spline、2nd half Spline、Spline 4 种类型。

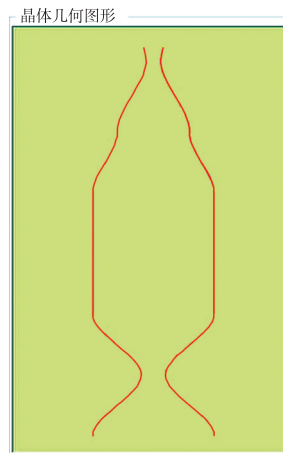


图 2 任意多段式数学模型

4 段式、任意多段式晶体数学模型建模都能建立完善的晶体数学模型,4 段式数学模型考虑了晶体籽晶与等径间平滑过渡关系,因此更适合晶体生长。4 段式设计在晶体数学模型上有局限性。任意多段式数学模型只设置每段的首尾直径和曲线类型,每段曲线单独成型,不考虑段间的平滑过渡关系。多段式晶体数学模型在 JGD 提拉单晶炉控制软件上最多可做出 18 段,曲线类型更多样丰富。

2 晶体生长控制的智能化理论

图 3 为 PID 控制原理。图中, $r(t) - c(t) = e(t)$,其中 $r(t)$ 为理论目标值, $c(t)$ 为实际测量值, $e(t)$ 为理论与实际测量值之差(速率误差)。经过 PID 作用后得到功率改变量 $u(t)$,且:

$$u(t) = P \left(e(t) + \frac{1}{I} \int_0^t e(t) dt + \frac{D de(t)}{dt} \right) \quad (1)$$

式中: P 为比例系数; I 为积分时间常数; D 为微分时间常数。

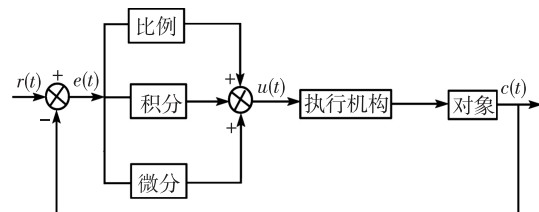


图 3 PID 控制原理图

JGD 提拉单晶炉控制软件采用 PID 控制。软件以晶体模型计算出参考速率 $r(t)$ (理论目标值),晶体实际质量由电子秤测量^[3],换算成实际速率 $c(t)$,由 $r(t) - c(t) = e(t)$ 得到速率误差 $e(t)$,通过式(1)得到功率改变量 $u(t)$ 。 $u(t)$ 将 $e(t)$ 控制在一个较小的范围内,最终实际晶体直径与晶体模型直径基本一致,实现对晶体直径的精确控制。

在实际速率跟随参考速率过程中,PID 控制起关键作用, $e(t)$ 越小, $u(t)$ 也越小,晶体生长结晶界面越稳定,最后晶体内部缺陷越少,质量也越好。

3 晶体生长控制的智能化实践

3.1 正常生长控制

图4为铈离子掺杂的钆铝镓石榴石晶体(GAGG)晶体生长控制曲线图,显示时长为3 h。图中,红色曲线是实际功率反馈曲线,绿色曲线为生长速率误差曲线,蓝色曲线为质量曲线。晶体模型由两段组成,当前段为等径阶段。

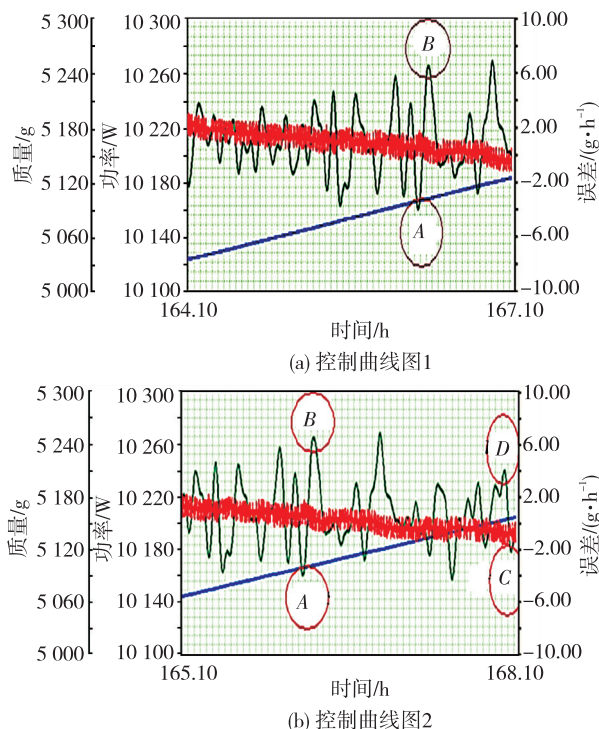


图4 晶体生长控制曲线图

由图4可看出,功率逐渐下降,质量曲线成线性向上增加,误差曲线呈周期性上下来回运动。图4(a)中误差曲线的波峰点(理想目标值与实际测量值之差的正向或负向最大值) $A = -5 \text{ g/h}$,波峰点 $B = 7 \text{ g/h}$ 。误差为 $\pm 10 \text{ g/h}$,但呈逐步发散的趋势,功率波动较大,误差波峰上下数值越来越大。

软件设定速率误差在理论速率值的30%内时为受控状态,误差最大值 A 、 B 在 $(+10, -10)$ 范围内,故目前误差曲线的状态受控,PID控制效果良好。PID控制参数为 $P=0.01$, $I=120$, $D=20$ 。

图4(b)为图4(a)在1 h后的控制曲线图。图4(b)中,波峰 $C = -2 \text{ g/h}$, $D = 3 \text{ g/h}$ 。由图可看出,误差曲线已开始收敛,即当前的PID参数合理,整个生长过程受控。

JGD 提拉单晶炉软件系统通过PID实现智能化控制,PID参数设置的原则如下:

1) PID参数对不同的温场和晶体是变化的。

2) PID控制效果需观察比较动态修改。

3) PID参数中,比例 P 的作用最大,积分 I 、微分 D 的作用次之。在不知道如何设置PID参数时,通常设 $I=200$, $D=200$,初步设 $P=0.2$ 。通过只调整 P 进行摸索,最终将误差控制在参考速率的 $\pm 30\%$ 范围内。在参考速率较小时,通常设定误差范围为 ± 2 。在总体可控的情况下,只加大 D 值,误差曲线的峰值可略降低;只加大 I 值,误差曲线整体有下移的趋势。相反亦然。

4) 在整个晶体生长过程中,晶体误差曲线一般在较小范围内呈正弦波动;偶尔波动范围大一点。但一个合理的控制是,误差曲线呈现长时间平稳在一小范围内后,会有一个略大范围内波动,然后再回到小范围波动。

5) PID参数中, $I \neq 0$ 。

图5为图4通过7~10天生长控制生长出的GAGG晶体。



图5 GAGG晶体实物

3.2 异常生长控制

晶体生长是一个系统工程,除软件控制外,水、电、气、温场及晶体材料自身的特性等都是系统稳定的重要因素。

3.2.1 水、电对系统的影响

稳定的电网、水循环和气氛系统是晶体外形和内部质量的重要保障。电网和水循环系统难免波动,如由于更多的设备开启与关停,或其他原因导致电网压流电压不平衡,以及水系统的压力波动等。这些不稳定导致晶体炉膛内生长平衡被打破,导致单位时间 Δt 内晶体生长质量增量 ΔG 发生异常改变。在JGD提拉单晶炉控制软件的误差曲线上表现为波峰峰值增大(曲线立即出现相应波动),软件会第一时间通过PID进行反向调节电源功率,

以保证系统的稳定,使晶体按设计要求进行生长。

3.2.2 温场对系统的影响

合理的温场梯度是晶体生长的核心,早期不知晶体生长温场是否合理;或多次生长后,温场破损,但在晶体生长过程中工艺人员不易发现。出现上述问题时,数据和曲线界面上显示相关数据超过警戒值后,JGD 提拉单晶炉控制软件会发出声光报警。当数据超过设定保护极限后,软件停止晶体生长,以保护坩埚设备等。

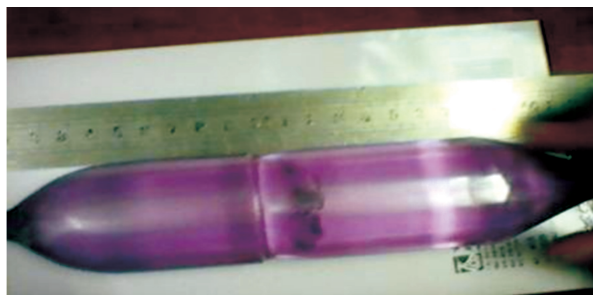
水、电、气或温场等原因导致晶体无法正常生长,从而触发 JGD 提拉单晶炉控制软件的控制极限保护功能,提拉机构以设定的拉脱速度将晶体拉离

液面,进入降温程序。

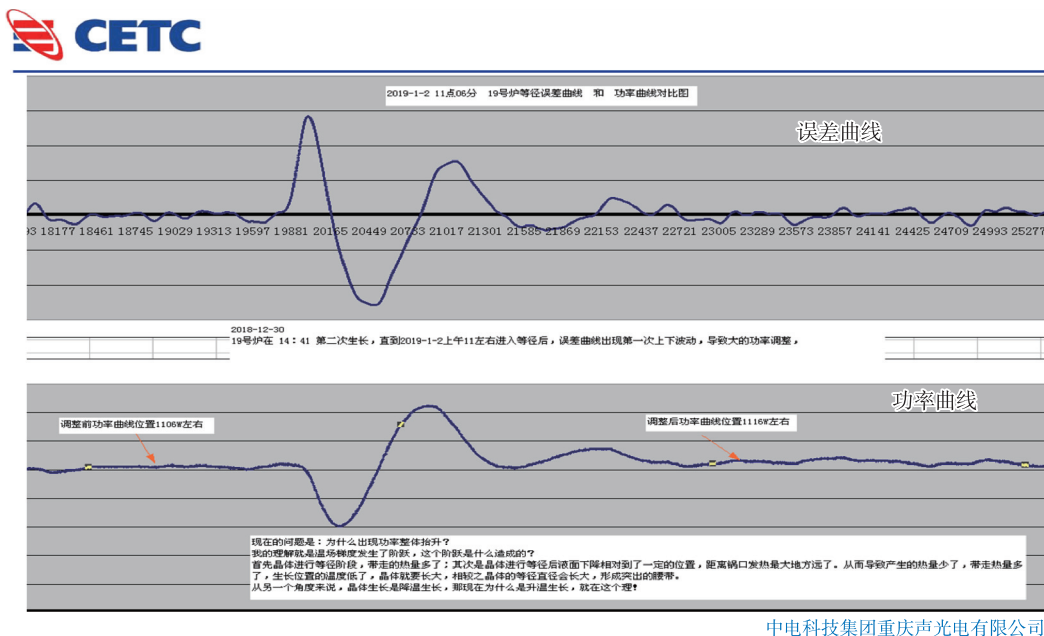
4 数据分析与监控

JGD 提拉单晶炉控制软件系统采用了大型 SQL 数据库进行数据存储,软件 2 s 采集 1 次晶体生长过程数据,该数据库可连续存储 6 个月的生长数据。晶体生长完成后,用户可查询并分析数据。当晶体质量出现问题后,可以分段进行数据分析,以便找出原因。

图 6 为连续生长 5 炉次后取出的晶体图,以及工艺人员利用 JGD 提拉单晶炉控制软件进行的全过程数据分析。



(a) 中部异常晶体



中电科技集团重庆声光电有限公司

(b) Excel数据生成的曲线

图6 中部异常晶体及曲线

由图 6(a)可看出,晶体中部位置直径有较大的波动,此波动后,生长又恢复正常。由图 6(b)可看出,晶体相应位置的速率曲线和功率曲线波动较大。通过数据分析对比,最终发现造成异常的原因是水系统的一次异常波动。

工艺人员不仅可对单炉次晶体生长数据进行查询分析,还可对多炉次晶体生长数据进行对比分析,以找到最合适的参数与指标,通过大数据的方法提高批量生长晶体的质量一致性。

数据处理方面需定期对数据进行清理,以保证

系统的正常运行。

该软件系统利用计算机 UDP/IP 协议总线方式组网,实现集中监控。从安全角度考虑,软件不能远程修改参数,只能实时观察。

未组网时,程序自动屏蔽远程实时监视功能。组网的情况下,监视主程序以令牌的方式与被监控设备进行轮询应答交付数据。保障系统高效有序稳定运行。经长期监测,系统的 CPU 约占 5%,内存占用低于 30%,系统稳定可靠。

5 结束语

JGD 提拉单晶炉控制软件通过晶体数学建模,以电子秤实时精确测量晶体质量,将晶体生长作为系统整体,通过 PID 公式计算出相应的功率调整量 $u(t)$,实现晶体生长过程智能化控制。生长过程中,软件也能够实时监测水电气、温场等异常情况。在异常不严重的情况下,软件通过 PID 实现功率调整,及时弥补异常情况。若异常情况较严重而无法弥补,软件会报警并进行异常处理,达到保护系统和晶体的目的。软件的大数据分析方法和远程监视功能便于工艺事后分析,可节省人力并提高效率。

目前该系统成功应用于中国电科芯片院 TGG^[4]、YAG、Al₅O₁₂:Pr^[5]、钽酸锂^[6]等晶体的生长,并广泛应用于清华大学及中国科学院等机构的晶体生长中。

参考文献:

- [1] 赵曙光. CZ 单晶炉晶体生长控制系统[J]. 科学论坛, 2012(34):111.
ZHAO Shuguang. CZ single crystal furnace crystal

growth control system[J]. Science Forum, 2012(34): 111.

- [2] 杨军良,尚付鹏,高鹏. 激光晶体提拉生长模糊 PID 控制系统[J]. 人工晶体学报, 2009,38(5):1175-1178.
YANG Junliang, SHANG Fupeng, GAO Peng. Laser crystal pulling method fuzzy PID control system[J]. Journal of Artificial Crystals, 2009,38(5):1175-1178.
- [3] 陈川贵,贺碧会,余建军,等. 单晶炉上称重电子秤系统的研究与分析[J]. 压电与声光, 2008,40(5):598-600.
CHEN Chuangui, HE Bihui, SHE Jianjun, et al. Research and analysis of weighing electronic scale system on single crystal furnace[J]. Piezoelectrics & Acousto-optics, 2008,40(5):598-600.
- [4] 龙勇,徐扬,石自彬,等. TGG 晶体偏心生长研究[J]. 压电与声光, 2015,37(2): 277-279.
LONG Yong, XU Yang, SHI Zibin, et al. Research on eccentric growth of TGG crystals[J]. Piezoelectrics & Acousto-optics, 2015,37(2): 277-279.
- [5] 丁雨瞳,刘军,冯大建,等. 5.5 cm Lu₃Al₅O₁₂:Pr 晶体生长与闪烁性能研究[J]. 压电与声光, 2015,37(4): 543-545.
DING Yuchong, LIU Jun, FENG Dajian, et al. Research on 5.5 cm Lu₃Al₅O₁₂:Pr crystal and scintillation performance[J]. Piezoelectrics & Acousto-optics, 2015,37(4):543-545.
- [6] 于明晓,龙勇,石自彬,等. 42°钽酸锂晶体生长及性能研究[J]. 压电与声光, 2023,45(1):26-28.
YU Mingxiao, LONG Yong, SHI Zibin, et al. Study on growth and properties of 42° rotated Y-cut lithium tantalate single crystals[J]. Piezoelectrics & Acousto-optics, 2023,45(1):26-28.