

恒组分提拉单晶炉的设计与研究

何 晔, 武 欢, 王旭光, 母江东, 邓 力, 宋晓佳

(中国电子科技集团公司第二十六研究所, 重庆 400060)

摘 要:晶体生长过程中由于溶质“分凝现象”的存在,会造成生长出来的晶体沿轴向不均匀分布,从而制约了大尺寸、超长、高均匀性晶体的生长。因此,该文设计了晶体自动生长控制系统和料棒自动补充控制系统,以保证晶体生长液面的高度不变,以及棒料添加组分与晶体组分一致,从而克服晶体生长过程中“分凝现象”的影响,也为晶体生长界面形状的稳定性控制奠定了可靠的基础。

关键词:恒组分;晶体生长;分凝;自动控制

中图分类号: TN304.053

文献标识码: A

Design and Study of Constant Components Czochralski Crystal Grower

HE Ye, WU Huan, WANG Xuguang, MU Jiangdong, DENG Li, SONG Xiaojia

(26th Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Chongqing 400060, China)

Abstract: In the process of crystal growth, as a result of the existence of solute segregation phenomenon, it will cause the grown crystal to distribute unevenly along the axial, so as to restrict the large size, long, high uniformity of crystal growth. Aiming at the problem, we design the automatic growth control system and the crystal bar automatic control system to ensure that the liquid crystal growth constant height remains unchanged and the bar add components and crystal components are the same. Not only overcome the segregation phenomenon in the process of crystal growth, but also laid the reliable foundation for the stability of the crystal growth interface shape.

Key words: constant components; crystal growth; segregation; automatic control

0 引言

提拉单晶炉是目前应用最广的晶体生长设备,提拉法是工艺最成熟,使用范围最广的一种晶体生长方法。但晶体宏观缺陷的存在仍影响着晶体的质量和利用,所以,研究晶体宏观缺陷的意义重大。

提拉法生长晶体^[1]时,多组分材料融化结晶成为一种新型材料,由于各溶质成分在固态和液态下的溶解浓度不同,因而结晶时随着结晶物的不断析出,溶质会在固态和液态中重新分布,即溶质的“分凝现象”^[2]。溶质的分凝特性使晶体的成分沿生长轴向不断变化,如果生长界面是曲面,还会产生径向的成分变化。在稳态生长的情况下,这种成分的变化是连续的,实际的提拉生长通常是在非稳态下进行的,生长率的波动将使晶体的成分产生不连续的变化。由于晶体许多物理性能是随成分变化的,

因此,成分的变化将使晶体的性能和可用性受到损坏,这样就会对晶体的工程化应用造成影响,特别是对晶体均匀性要求较高的场合影响较大。

本文从晶体生长过程中形成熔液浓度差别的根源入手,在原提拉单晶炉的基础上,设计了由两套自动控制系统组成的恒组分提拉单晶炉,使熔液组分浓度在整个生长过程中始终维持在一个较小的波动范围内,从而有效解决晶体“分凝现象”造成的晶体沿轴向不均匀分布的问题,同时,也改善了由于晶体持续生长而造成的结晶界面下移对晶体生长界面形状的影响。

1 恒组分提拉单晶炉结构及工作原理^[3]

恒组分提拉单晶炉是在原提拉单晶炉的基础上进行改进和优化设计,主要是由晶体自动生长控制系统和料棒自动补充控制系统组成,如图1所示。

收稿日期:2015-06-30

作者简介:何晔(1972-),男,四川省南部县人,高级工程师,主要从事拉单晶炉的结构和控制设计,单晶炉制作和改造。E-mail: heye911416@163.com。

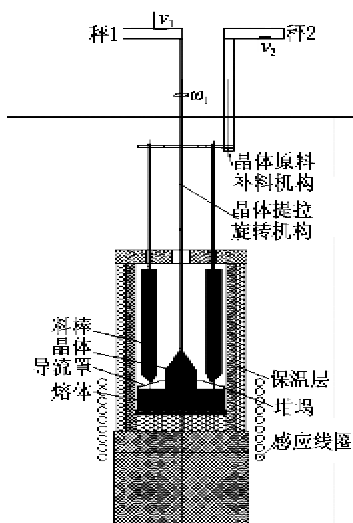


图1 结构示意图

晶体自动生长系统^[4]由秤1、提拉系统、旋转系统及感应加热模块(即图中感应线圈)等组成。秤1实时测量出生长晶体的质量 G_1 ;提拉系统通过步进电机产生一定的提拉速度 v_1 使晶体不断向上生长;旋转系统通过力矩电机产生一定的旋转速度 ω_1 来实现晶体的连续性生长;感应加热模块提供晶体生长所需热能量。与传统提拉单晶炉相比,该系统晶体结晶液面高度始终保持不变,液面的高度由自动加料系统自动进行补偿和调整,因而晶体长度方向的理论速度就是 v_1 。同时,该系统克服了传统提拉系统由于坩埚内径尺寸不同、液面下降导致生长界面温度改变等主动性误差的影响。

棒料自动加料系统由秤2及下降系统等组成。秤2实时测量出补充棒料的质量 G_2 ;下降系统通过步进电机产生一定的下降速度 v_2 。通过晶体理论质量的增加速度可计算出 v_2 ,以实际质量($G_1 + G_2$)测量误差作为调整 v_2 的调整源,始终保证长出的晶体质量与补充的原料质量一致,从而保证坩埚内液面高度相对不变。由于补充的棒料成分经过预先的科学计算和实际测量,与生长出的晶体成分一致,进而保证坩埚内液体成分不变,也保证了生长出的晶体沿轴向的分布均匀性。

2 自动生长控制系统^[5-6]

图2为晶体自动生长控制系统的流程图。

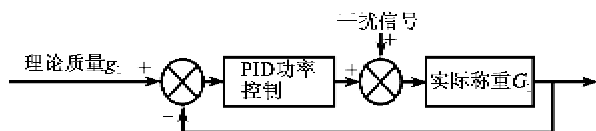


图2 晶体自动生长控制系统

由图2可见,晶体理论质量为所需尺寸的晶体质量,即

$$g_1 = \rho \pi r^2 v_1 t \quad (1)$$

式中: r 为晶体半径; t 为累积时间(即生长时间); ρ 为晶体密度。由于有补料机构,理论上总是维持液面高度不变,所以,式(1)没有晶体原料液体密度与固体密度差值造成的液面下降量,也不需坩埚内径参数,排除了坩埚内径尺寸不一致产生的给定误差。 $\Delta G = G_1 - g_1$ 为晶体实际生长质量与理论质量的差值,它作为控制加热功率 P 的增量值,通过调节加热功率,改变晶体生产界面的温度分布,进而调节晶体的生长速度。通过上述循环,可达到晶体整个生长过程的全自动控制。

3 棒料自动补充控制系统

图3为棒料自动补充控制系统的流程图。图中 g_2 为棒料的质量

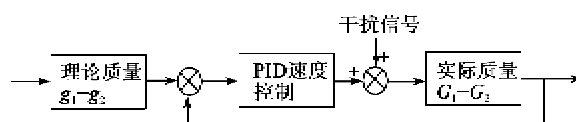


图3 棒料自动补充控制系统

要维持图2中的液面高度不变,必须加入棒料自动补充控制系统。该系统的控制思想是晶体从坩埚里长出了多重的晶体,则补充棒料就在坩埚内熔化相应质量的晶体原料,由于补充棒料成分与长出坩埚的晶体成分一致,所以,坩埚内液体的成分及液面的高度始终保持不变,从而保证所生长的晶体在轴向成分的高度一致。

由式(1)可得晶体的理论质量生长速度为

$$g_1/t = \rho \pi r^2 v_1 \quad (2)$$

要维持液面高度不变,自动棒料补充系统也应有同样的质量补充速度,即

$$\rho \pi r^2 v_1 = \rho' \pi r'^2 v_2 \quad (3)$$

$$v_2 = \rho r^2 v_1 / \rho' r'^2 \quad (4)$$

式中: r' 为棒料有效半径(等同多根棒料半径所形成的截面积); ρ' 为棒料密度。

图3中,以秤1所得质量为参考量,秤2所得质量为适应量,理论上两者相加($\Delta G' = (G_1 + G_2)$)为0(开始生长时两台秤都进行了清零,或减去初始相加量($G_1 + G_2$)₀),如果不为0,PID控制器工作输出一个 Δv 增量去调节速度 v_2 ,改变补充料的速度,使 $\Delta G'$ 向靠近0的方向发展,从而达到液面高度和浓

度不变的目的。

4 系统简化设计

恒组分晶体生长的结构和控制思路可进行一定的简化设计,其控制可达到较好效果。

把图 1 中的秤 2 去掉,即不测量棒料的质量,棒料自动补充系统为开环控制,由式(4)可得 v_2 ,不作闭环反馈控制,其造成的误差作用到晶体自动控制系统中,可把该误差作为影响晶体生长的一个因素来处理。

假如棒料补充过多,液面上升,则晶体生长减少,那么晶体自动控制系统将降温,以加快晶体的结晶速度,从而使液面下降到合适位置。同理,当棒料补充过少,液面下降,则晶体生长加快,那么晶体自动控制系统将升温,以降低晶体的结晶速度,从而使液面上升到合适的位置。因此,经过该系统的自动调节,生长液面也能维持较好的稳定性,但如果 v_2 、 r' 、 ρ' 的误差较大,建议不使用该简化控制系统。

5 结束语

通过对恒组分晶体生长系统的设计与研究,较好地解决了晶体生长过程中“分凝现象”对晶体生长和应用方面的制约,对于生长大尺寸、高质量及高均匀性的晶体优势尤其明显,同时为晶体生长界面形状稳定性自动控制的研究提供了可能。

参考文献:

- [1] 朱志伟. 顶部籽晶提拉法激光晶体生长工艺有限元模拟[D]. 长春: 长春理工大学, 2012.
- [2] 臧竞存. 新型晶体材料[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007.
- [3] 曹建伟. 直拉式单晶硅生长炉的关键技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2010.
- [4] 宋超. 人体掌形生物特征识别技术的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2007.
- [5] 李娟. 硅单晶生长速度控制系统研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2009.
- [6] 曾东方. 单晶生长过程直径检测与化料过程模式分类方法研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2009.
- [7] LAKIN K M. A review of thin-film resonator technology[J]. Microwave & Magazine, IEEE, 2003, 4(4): 61-67.
- [8] 黄振华, 高杨, 蔡洵, 等. 基于六端口反射计的体声波传感器读出电路[J]. 压电与声光, 2015, 37(6): 1066-1070.
HUANG Zhenhua, GAO Yang, CAI Xun, et al. The six-port read-out circuit of bulk acoustic wave sensor [J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2015, 37(6): 1066-1070.
- [9] 许聪聪. 基于六端口技术的反射计系统设计[D]. 成都: 电子科技大学, 2013.
- [10] LI C, ZHANG H, WANG P. A novel six-port circuit based on four quadrature hybrids[J]. International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering, 2010, 20(1): 128-132.

(上接第 185 页)

- [4] BENETTI M, CANNATA D, DAMICO A, et al. Thin film bulk acoustic wave resonator (TFBAR) gas sensor[C]//S. I., IEEE Ultrasonics Symposium, 2004, 3: 1581-1584.
- [5] GABL R, FEUCHT H D, ZEININGER H, et al. First results on label-free detection of DNA and protein molecules using a novel integrated sensor technology based on gravimetric detection principles[J]. Biosensors & bioelectronics, 2004, 19(6): 615-620.
- [6] HUMBERTO C, JOSÉ A P, JOSEP M, et al. High-frequency sensor technologies for inertial force detection based on thin-film bulk acoustic wave resonators (FBAR) [J]. Microelectronic Engineering, 2009, 86(4/6): 1254-1257.