

导模法生长大尺寸蓝宝石板材技术取得重要突破

王东海¹, 李东振¹, 徐军²

(1. 南京同溧晶体材料研究院有限公司, 南京 211211; 2. 同济大学 上海蓝宝石单晶工程技术研究中心, 上海 200092)

摘要: 蓝宝石晶体具有高硬度、高机械强度, 且在紫外-可见波段优异的透过率, 是优秀的红外窗口和透明装甲材料。导模法生长的蓝宝石板材尺寸和形状接近“近净型”, 将加工的成本降到极低。南京同溧晶体材料研究院有限公司近期采用导模法成功生长出尺寸为 415 mm×810 mm×12 mm 的蓝宝石单晶板材。

关键词: 导模法; 蓝宝石板材; 透明装甲

中图分类号: TQ174 文献标志码: A

An Important Breakthrough in the Technology of Sapphire Plate with Large Size Grown by the Edge-defined Film-fed Growth Method

WANG Donghai¹, LI Dongzhen¹, XU Jun²

(1. Nanjing Tongli Crystal Material Institute Co., Ltd, Nanjing 211211, China; 2. Shanghai Engineering Research Center for Sapphire Crystal, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Sapphire possesses excellent hardness, strength, and UV-IR transmittance properties, which make it as an excellent candidate for IR window and transparent armor material. Sapphire plate with large size grown by the Edge-defined Film-fed Growth (EFG) method appears “near-net” size, which can minimize processing cost. Recently Nanjing Tongli Crystal Material Institute Co., Ltd. has accomplished large size sapphire plate successfully by EFG method, with size up to 415 mm × 810 mm × 12 mm.

Key words: edge-defined film-fed growth method; sapphire plate; transparent armor

蓝宝石晶体具有优异的力学性能和光学性能, 如高强度、高硬度、耐高温、耐腐蚀、防辐射, 在紫外、可见、3~5 μm 红外宽波段范围内具有高的透过率, 是理想的红外窗口和透明装甲材料。光电窗口和透明装甲材料最常用的形状为平板状和弧形, 目前, 大尺寸蓝宝石单晶的主要生长方式有热交换法^[1]、泡生法^[2-3]、水平定向区熔法^[4]和导模法^[5]。由于技术上的差异, 导模法(Edge-defined Film-fed Growth, 又称 EFG 法)生长蓝宝石大板材长晶速度快, 高达 25 mm/h, 而其它生长方法长晶速度均在

5 mm/h 以下, 整个长晶周期约 2 w 以上。导模法晶体毛坯最接近目标尺寸要求, 比较适合大尺寸蓝宝石单晶板材或异形板材的生长。

目前, 国内外只有圣戈班公司实现了导模法产业化生产大尺寸蓝宝石板材, 并且已经装备了美军阿帕奇武装直升机、F-35 和 F-22 战斗机等^[4]。我国的大尺寸蓝宝石板材的技术研发开展较晚, 2019 年同济大学和南京同溧晶体材料研究院有限公司生长的蓝宝石板材尺寸为 300 mm×690 mm×12 mm, 质量达到 10 kg^[5]。2022 年北京中材人工晶体研究院有

收稿日期: 2022-11-11; 收到修改稿日期: 2022-11-18; 网络出版日期: 2022-01-17

作者简介: 王东海(1982-), 男, 博士. E-mail: yingxiong3258@sina.com

WANG Donghai (1982-), male, PhD. E-mail: yingxiong3258@sina.com

通信作者: 李东振, 博士. E-mail: dzhl@siom.ac.cn; 徐军, 教授. E-mail: 15503@tongji.edu.cn

LI Dongzhen, PhD. E-mail: dzhl@siom.ac.cn; XU Jun, professor. E-mail: 15503@tongji.edu.cn

限公司生长的蓝宝石板材尺寸为 $370\text{ mm}\times 1000\text{ mm}\times 12\text{ mm}$ ^[6]。

同济大学上海蓝宝石单晶工程技术研究中心和南京同溧晶体材料研究院有限公司先后建立了导模法生长蓝宝石单片、同步多片、弧形片、圆管、微管^[7]、单端封口管、单晶光纤^[8]等系列装备和技术平台。采用双石墨发热体加热和双电源，分别独立控温，其中下部为主加热器，上部为辅加热器，突破了传统导模法的单一发热体，在动态调控炉内温度梯度提升长晶质量的同时，实现超大尺寸晶体生长和原位退火。自主设计开发了国产大型智能化导模法单晶炉装备，具有以下特点：长方形炉腔、坩埚自动升降、籽晶杆有效行程大、高精度电子称自动称重和视频监控。采用 ANSYS 软件数值模拟计算，实现上、下双石墨加热(双温区)热场设计和制造，采用三气氛(Ar, CO 和 CO₂)混合流动控制(非传统导模法采用单一氩气气氛)，以抑制石墨加热体、碳毡保温层(C)等对熔体和晶体的污染。继 2019 年成功生长出尺寸为 $300\text{ mm}\times 690\text{ mm}\times 12\text{ mm}$ 蓝宝石板材，2021 年晶体尺寸突破 $355\text{ mm}\times 800\text{ mm}\times 12\text{ mm}$ ，如图 1 所示。最近，又新设计开发了多台套大型单晶炉和优化热场，解决了超大尺寸蓝宝石板材晶体生长的系列关键科学技术问题，在国际上率先用导模法生长出 $415\text{ mm}\times 810\text{ mm}\times 12\text{ mm}$ 的蓝宝石板材晶体，质量为 17.5 kg，如图 2 所示，进一步巩固了我国在导模法蓝宝石晶体生长技术研究领域的领先地位。

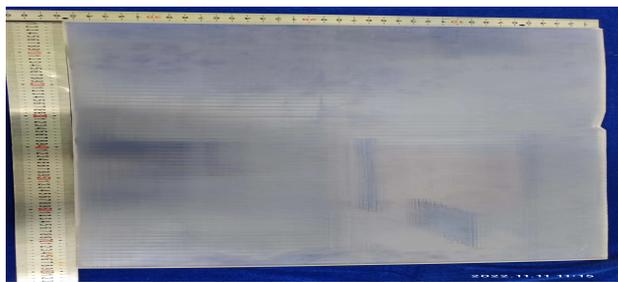


图 1 $355\text{ mm}\times 800\text{ mm}\times 12\text{ mm}$ 导模法生长的蓝宝石板材
Fig. 1 Sapphire plate grown by EFG method with size of $355\text{ mm}\times 800\text{ mm}\times 12\text{ mm}$

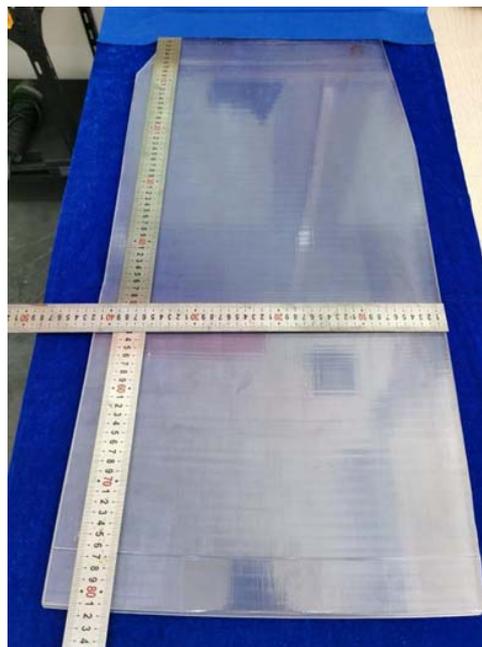


图 2 $415\text{ mm}\times 810\text{ mm}\times 12\text{ mm}$ 导模法生长的蓝宝石板材
Fig. 2 Sapphire plate grown by EFG method with size of $415\text{ mm}\times 810\text{ mm}\times 12\text{ mm}$

参考文献:

- [1] SCHMID F, KHATTAK C P. Current status of sapphire technology for window and dome applications. *Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering*, 1989(**1112**): 25.
- [2] 欧阳鹏根. 浙江晶盛机电股份有限公司再创佳绩——首颗 700 kg 级超大尺寸蓝宝石晶体生长成功. *人工晶体学报*, 2021, **50**(1): 52.
- [3] 康森, 鲁雅荣, 石天虎, 等. 改良泡生法生长 720 kg 级大尺寸蓝宝石晶体. *人工晶体学报*, 2021, **50**(8): 1397.
- [4] MONTGOMERY M, BLOCKBURGER C. 18×36×1.5 inch sapphire panels for visible and infrared windows. *Proceedings of SPIE Defense + Security*, 2017(**10179**): 1.
- [5] 王东海, 徐军, 李东振, 等. 导模法生长超大尺寸蓝宝石板材的研究. *人工晶体学报*, 2020, **49**(3): 398.
- [6] 赵鹏, 王晓亮. 北京中材人工晶体研究院有限公司成功生长“米级”超大口径蓝宝石单晶. *人工晶体学报*, 2022, **51**(8): 1511.
- [7] WANG D H, XUE Y Y, LI N, *et al.* Micro-tube sapphire crystal grown by the edge-defined-film fed method. *Journal of Inorganic Materials*, 2019, **34**(12): 1290.
- [8] WANG D H, HOU W T, LI N, *et al.* Defects and optical property of single-crystal sapphire fibers grown by edge-defined film-fed growth method. *Journal of Inorganic Materials*, 2020, **35**(9): 1053.