

文章编号: 0253-2239(2001)03-0383-02

LIGO 计划用大尺寸蓝宝石晶体光学均匀性和弱吸收获得进展

周国清 李红军 乔景文 周永宗 邓佩珍 徐 军

(中国科学院上海光学精密机械研究所激光与光电子材料研究与发展中心, 上海 201800)

摘要: 报道了 $\phi 113 \text{ mm} \times 70 \text{ mm}$ 蓝宝石晶体块的光学加工精度、光学均匀性和弱吸收等方面研究所取得的最新进展。晶体整个表面加工精度达到 3 个光圈(峰谷值约为 1.666λ)；晶体的透过波前畸变为 1 个光圈(峰谷值约为 0.584λ)；在紫外波段的透过大于 80%，可见及红外光区的透过大于 86%；晶体的弱光吸收系数为 $35 \times 10^{-6} / \text{cm} \sim 65 \times 10^{-6} / \text{cm}$ 。

关键词: 晶体；蓝宝石；光学均匀性；弱吸收

中图分类号: O731 文献标识码: B

蓝宝石晶体($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 单晶)具有优良的光学、机械、化学和电性能。从 190 nm 至 5.5 μm 波段均具有很高的光学透过率,被广泛用作各种光学元件和红外军事装置、卫星空间技术、高强度激光的窗口材料。

蓝宝石晶体化学稳定性好,耐宇宙射线辐照能力强,且可得到高度完整的大尺寸单晶,而且热噪音仅为石英玻璃的十六分之一,密度为石英玻璃的 1.9 倍,模式因子 Q 比石英玻璃高两个数量级,所以以蓝宝石晶体作为干涉仪内的光学介质将极大地提高测量灵敏度。蓝宝石晶体已被美国国家自然科学基金委员会作为 LIGO (Laser Interferometer Gravitational Wave Observatory) 计划中首选的光学材料。LIGO 计划的目的是建造两台世界上最大的激光引力干涉仪,其真空臂长达 9 km,用于探测地球重力波。其中作为平面、分光透镜的蓝宝石晶体的最终要求是:尺寸为 $\phi 250 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$,晶体方向为零双折射方向即(0001),在中心 $\phi 80 \text{ mm}$ 直径内的光学均匀性 $\Delta n < 2 \times 10^{-7}$,弱光吸收系数(1064 nm)小于 $10^{-6} / \text{cm}$ 。

本文简要报道了大尺寸蓝宝石晶体块的光学加工精度、光学均匀性和弱吸收等方面研究所取得的最新进展。

采用温梯法(TGT)生长了 $\phi 115 \text{ mm} \times 80 \text{ mm}$ 的大尺寸优质蓝宝石晶体,晶体外形完整,等径部位不开裂。选择了国内外的高纯粉料或焰熔法蓝宝石碎

晶体作为生长原料,定量分析了不同纯度的原料对晶体质量的影响。从上述尺寸的晶体毛坯中切除放肩部位,获得 $\phi 113 \text{ mm} \times 70 \text{ mm}$ 的等径晶体。采用化学腐蚀与光学显微镜结合的方法,表征了温梯法蓝宝石晶体的整体位错密度及分布情况。总体而言,温梯法生长的蓝宝石晶体的完整性很高,其位错密度一般为 $2 \times 10^3 \text{ cm}^{-2} \sim 3 \times 10^3 \text{ cm}^{-2}$ ^[1],X 射线双晶衍射的摆动曲线半峰宽为 10 arcsecond \sim 20 arcsecond。

蓝宝石晶体硬度很高(9.0 Mohs),仅次于金刚石,因此加工非常困难,目前国外一般以加工两英寸蓝宝石晶体为主,还不能加工大于 100 mm 直径的蓝宝石晶体。我们通过研究了不同磨料、不同加工盘片与晶体表面光洁度、平面度和平行度的关系,采用机械加工和化学抛光相结合的办法,使用合金胶盘加工蓝宝石晶体获得成功。

图 1 为 $\phi 113 \text{ mm} \times 70 \text{ mm}$ 蓝宝石晶体在 ZYGO 干涉仪下观测到的晶体表面面形干涉图。晶体表面的峰谷值(PV)为 1.666λ ,均方根(RMS)为 0.364λ ,高低圈(power)为 1.483λ ,在整个表面内加工精度为 3

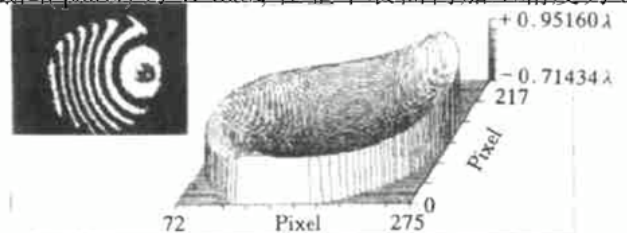


Fig. 1 The crystal surface map of sapphire sample ($\phi 113 \text{ mm} \times 70 \text{ mm}$)

个光圈。图 2 为蓝宝石晶体在 ZYGO 干涉仪下观测到的透过波前畸变干涉图。峰谷值为 2.023λ , 均方根值为 0.480λ , 高低圈为 -1.76λ , 在整个表面内加工精度为 4 个光圈。

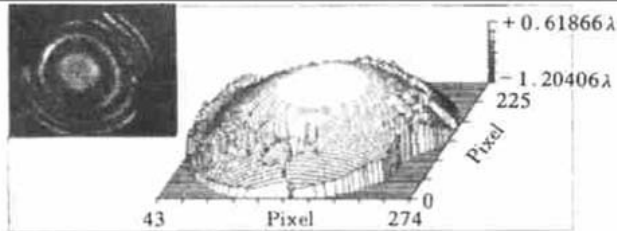


Fig. 2 The wavefront map of sapphire sample
($\phi 113 \text{ mm} \times 70 \text{ mm}$)

由于蓝宝石晶体是在高温缺氧条件下生长的, 一般都会在晶体内部因缺氧而形成大量氧空位, 当氧空位与自由电子相互作用时便形成色心缺陷, 如 F 心和 F_2 心等。此外, 高温晶体在生长结束后的冷却过程中存在很大的内应力。为了消除晶体的色心缺陷和热应力, 对于温梯法生长的蓝宝石晶体都要进行高温退火, 退火温度达 $1600 \text{ }^\circ\text{C}$, 经高温退火后, 极大地消除晶体的内应力, 并提高了晶体的光学均匀性。用 Perkin-Elmer (UV/VIS/NIR) 分光光度计测量了蓝宝石晶体的透过率, 蓝宝石晶体在紫外波段的透过大于 80%, 在可见及红外光谱区域的透过大于 86%。

图 3 为 $\phi 113 \text{ mm} \times 70 \text{ mm}$ 晶体样品的干涉图形。峰谷值为 0.584λ , 均方根值为 0.050λ , 高低圈为 -1.732λ , 图中已排除了晶体表面加工对干涉条纹的影响, 在整个表面内精度为一个光圈。说明了

蓝宝石晶体内部具有很好的光学均匀性, 经测量光学均匀性 $\Delta n = 5 \times 10^{-6}$ 。

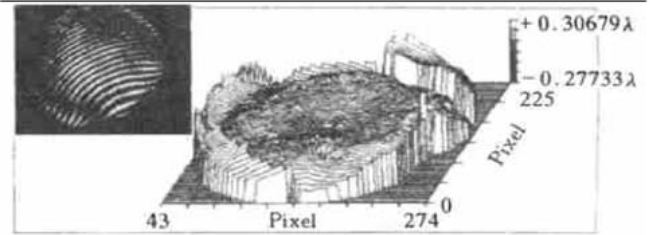


Fig. 3 The wavefront map removed power of sapphire sample
($\phi 113 \text{ mm} \times 70 \text{ mm}$)

LIGO 工程对我研究小组生长的 $\phi 113 \text{ mm} \times 70 \text{ mm}$ 蓝宝石晶体测试了在 1064 nm 波长处的弱吸收系数, 并与美国 Crystal System Inc. (CSI) 公司采用热交换法 (HEM) 生长的蓝宝石晶体进行了比较, 结果是我们提供的晶体的弱光吸收系数为 $35 \times 10^{-6} / \text{cm} \sim 65 \times 10^{-6} / \text{cm}$. 优于美国 Crystal System Inc. 公司提供的样品 ($80 \times 10^{-6} / \text{cm}$)。

结论 温梯法生长的大尺寸蓝宝石晶体在晶体光学精密加工、光学均匀性和弱吸收系数等研究指标上均取得了较大的进展。这些晶体参数已达到 LIGO 计划对蓝宝石晶体的第一阶段的性能要求, 并为第二阶段晶体的研制奠定了基础。

参 考 文 献

- [1] 周国清, 徐 军, 邓佩珍等. 温梯法 Al_2O_3 晶体位错形貌分析. 人工晶体学报, 1999, (8): 249~ 252

Progress of Optical Homogeneity and Weak-Absorption of Large-Sized Sapphire Crystal Used in LIGO Project

Zhou Guoqing Li Hongjun Qiao Jingwen Zhou Yongzong Deng Peizhen Xu Jun
(R&D Center for Laser and Opto-Electronic Materials, Shanghai Institute of Optics
and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

(Received 18 October 2000; revised 5 December 2000)

Abstract: The latest progress in the study of optical homogeneity and weak-absorption of large-sized sapphire crystal ($\phi 113 \text{ mm} \times 70 \text{ mm}$) is reported. The polishing precision of the whole crystal surface reaches 1.666λ , and the transfer wavefront distortion is 0.584λ . The transmission is higher than 80% at UV waveband and than 86% at VIS-NIR waveband. The weak-absorption coefficient is $35 \times 10^{-6} / \text{cm} \sim 65 \times 10^{-6} / \text{cm}$.

Key words: crystal; sapphire; optical homogeneity; weak-absorption