

文章编号: 0258-7025(2004)Supplement-0381-03

大尺寸掺钛蓝宝石激光晶体的研究进展

司继良, 徐军, 赵广军, 周国清, 李红军, 王静雅, 邓佩珍

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘要 简述了掺钛蓝宝石(Ti:Al₂O₃)晶体在飞秒超快高功率激光方面的应用发展状况,指出生长大尺寸高质量掺钛蓝宝石晶体是发展高功率激光系统的关键。总结了国内外掺钛蓝宝石晶体的生长方法,比较了不同生长方法的优缺点。提出了今后发展大尺寸优质钛宝石的方向。

关键词 激光晶体; 钛宝石; 晶体生长; 温梯法

中图分类号 TN244; O433.5

文献标识码 A

Development of Research on Large-Sized Ti:Sapphire Laser Crystals

SI Ji-liang, XU Jun, ZHAO Guang-jun, ZHOU Guo-qing, LI Hong-jun

WANG Jing-ya, DENG Pei-zhen

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

Abstract The applications of Ti-doped sapphire (Ti:Al₂O₃) in femo-second ultra-fast and high-average-power laser system were described briefly. It is suggested that the growth of large-sized Ti:Sapphire with high optical properties is the key note in ultra fast and high power laser applications. The various growth methods of Ti:Al₂O₃ were reviewed, and the development of large-sized Ti:Al₂O₃ with high quality is proponed in the end of this paper.

Key words laser crystals; Ti:Al₂O₃; crystal growth; temperature gradient technique (TGT)

1 引言

掺钛蓝宝石(Ti:Al₂O₃)晶体呈红色,属于六方晶系,空间群为 $R\bar{3}C-D_{3d}^5$,是性能优良的可调谐激光晶体。Ti:Al₂O₃晶体的调谐范围约为660~1200 nm,晶体在490 nm处具有最大吸收峰,其 π 偏振吸收截面约为 $(9.3\pm 1.0)\times 10^{-20}$ cm²;在780 nm处其发射截面为 3.9×10^{-19} cm²。与其他常用的Cr³⁺:BeAl₂O₄, Cr³⁺:LiCAF, Cr:YAG和Cr:Mg₂SiO₄等可调谐激光晶体相比,掺钛蓝宝石具有宽调谐(约600 nm)以及物化性能优良(特别是具有最好的导热性能)等优点,因此,可以广泛应用于军事、医疗以及科研等领域。

近年来,随着飞秒超快高功率激光技术等的迅猛发展,掺钛蓝宝石晶体在高功率激光(激光惯性聚变ICF驱动)领域中占据有其他可调谐晶体无法比拟的绝对优势。生长具有高光学质量大尺寸优质掺钛蓝宝石晶体对发展超快激光和高功率激光等具有重要意义。本文概述了掺钛蓝宝石晶体在超快高功率激光方面的应用及其发展状况,讨论了国内外生长掺钛蓝宝石晶体的方法,并指出了掺钛蓝宝石晶

体的发展方向。

2 Ti:Al₂O₃晶体在飞秒高功率激光方面的应用

超短脉冲高功率固体激光器是近十年来激光技术的一个重要发展方向。而飞秒超快器件的核心就是能够产生飞秒超短脉冲的激光晶体。钛蓝宝石激光晶体的增益带宽最宽(660~1200 nm),根据理论计算其最短脉宽为3.3 fs^[1],这是迄今为止根据理论计算可能获得最短飞秒激光的激光晶体,因此掺钛蓝宝石晶体是当前国际上公认的最理想的飞秒超快激光晶体。以下重点介绍了国内外大尺寸掺钛蓝宝石晶体在飞秒超快高功率激光方面的应用发展状况。

20世纪90年代以来,由于惯性约束核聚变(ICF)研究中需要发展新一代实用经济的、有超快、高功率、高能量特性的激光驱动系统。因为钛宝石晶体激光器的宽带调谐特征,在1050~1070 nm波段同样具有相当的增益,因而它可以作为掺钕玻璃激光系统中的前级放大器。特别是由于增益宽带的

作者简介: 司继良(1974-),男,中国科学院上海光学精密机械研究所工程师。主要从事激光晶体生长及其性能的研究。
E-mail: sijiliang@sohu.com

存在,导致在钽玻璃激光中出现的光谱窄化现象被大幅度降低以致基本上观察不到。美国利弗莫尔实验室在以钛宝石晶体飞秒激光脉冲作为种子脉冲信号,并采用啁啾脉冲放大技术,以钛宝石激光器作为前级放大器,以钽玻璃激光器作为末级放大器的混合系统的输出功率可达到 1.25 PW,最后可取得 $10^{21} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ 的激光辐照强度,这一强度超过产生等离子体的要求的阈值一千倍。

目前,中国科学院上海光学精密机械研究所能提供钛宝石的晶片最大器件口径尺寸为 $\phi 80 \text{ mm}$,国内外器件专家已采用本所的钛宝石激光介质研制成功一流水平的飞秒超短脉冲和太瓦级高功率激光器件^[4],其中用两块 $\phi 25 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ 的温梯法生长的高掺浓度钛宝石晶体放大器,在国内已研制成功 15 TW/33 fs 的钛宝石激光系统。

3 大尺寸 $\text{Ti}:\text{Al}_2\text{O}_3$ 晶体的生长方法及进展

获得高质量大尺寸晶体的生长方法主要有提拉法(CZ)、热交换法(HEM)和温梯法(TGT),现分别叙述如下。

3.1 提拉法

提拉法是生长氧化物晶体的常用方法之一,其特征在于观察方便、生长参数调节容易等,因此,采用中频感应加热 Ir 金坩埚提拉法可以生长白宝石和掺钛宝石等晶体。例如早在 20 世纪 80 年代末, M. R. Kokta^[5]采用提拉法生长 $\text{Ti}:\text{Al}_2\text{O}_3$ 晶体, Ti^{3+} 含量为 (0.1~0.24)wt-%, 在 800 nm 处光损失为 $4 \times 10^{-3} \text{ cm}^{-1}$, 他们认为晶体中存在的 Ti^{4+} 会增加晶体中的点缺陷并且引起光学质量的下降,通过改进生长工艺及后序退火工艺,晶体的品质因子(FOM)值已超过 200。但提拉法生长掺钛宝石晶体具有下列缺点: 1) 由于提拉法生长系统具有弱氧化性气氛,因此在生长出的晶体中含有大量的 Ti^{4+} 离子,或者 $\text{Ti}^{3+}-\text{Ti}^{4+}$ 离子对,容易产生附加吸收,导致了钛宝石晶体的红外残余吸收较为严重; 2) 由于钛宝石晶体的熔点较高(约 2050 $^{\circ}\text{C}$),在高温弱氧化性气氛中 Ir 金挥发严重; 3) 容易产生镶嵌结构,严重影响晶体的质量。

3.2 热交换法

与上述提拉法相比,热交换方法采用钨坩埚,石墨加热体,氩气为保护气体,整个生长系统呈现弱还原气氛,所生长的掺钛宝石晶体含有大量的三价钛离子,晶体质量较提拉法生长的要高。美国晶体系统公司 F. Schmid 等^[6]采用热交换法生长了晶体毛

坯直径达 $\phi 150 \text{ mm}$ 的高质量 $\text{Ti}:\text{Al}_2\text{O}_3$ 晶体。但该方法具有如下缺点: 1) 难于在零双折射方向(0001)上生长单晶,因为 π 偏振(平行于光轴)抽运的激光输出大于 σ 偏振(垂直于光轴)抽运的激光输出,故在钛宝石激光器中晶体都采用 π 偏振布置,因此晶体利用率低; 2) He 作为热交换气体,用量大,价格昂贵,成本很高。

3.3 导向温度梯度法

导向温度梯度法(TGT)是中国科学院上海光学精密机械研究所周永宗的专利技术^[7]。其结晶原理与上述热交换法相似,也是采用石墨发热体,Mo 保温屏,Mo 坩埚,氩气保护气氛。温梯法和热交换法的主要不同在于前者采用水冷却技术而后者采用 He 气冷却。温梯法生长的 $\text{Ti}:\text{Al}_2\text{O}_3$ 晶体有以下特点: 1) 晶体的结构完整性高; 2) 高的光学均匀性; 3) 具有高掺 Ti^{3+} 浓度,其 Ti_2O_3 的掺杂浓度在 0.02%~0.52%(质量比); 在 490 nm 处的峰值吸收系数最高达 9.0 cm^{-1} , 比提拉法和热交换法生长的晶体的峰值吸收系数都高; 4) 具有高的 FOM 值: 采取强还原气氛下高温退火,提高其 FOM 值,超过 400; 5) 可以生长出大尺寸的钛宝石激光器件片: 已经生长出 $\phi 120 \text{ mm} \times 80 \text{ mm}$ 的毛坯晶体,并已经按布儒斯特角加工成口径 $\phi 50 \text{ mm}$ 性能优良的的钛宝石激光晶片,分别如图 1 所示。目前,中国科学院上海光学精密机械研究所可以提供 $\phi 80 \text{ mm}$ 的高性能钛宝石晶片。

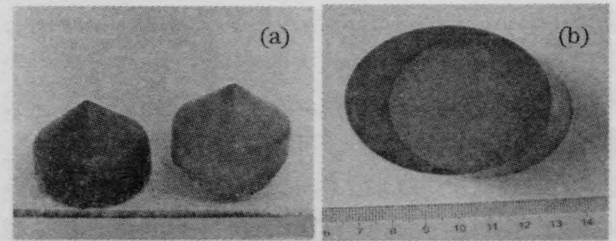


图 1 (a) TGT 法生长的 $\phi 120 \text{ mm}$ 钛宝石晶体毛坯; (b) 按布儒斯特角加工的 $\phi 50 \text{ mm}$ 钛宝石激光晶片

Fig.1 (a) TGT-Ti:sapphire with $\phi 120 \text{ mm}$; (b) The slice of $\phi 50 \text{ mm}$ Ti:sapphire with Brewster angle

4 大尺寸 $\text{Ti}:\text{Al}_2\text{O}_3$ 晶体的研究展望

自 1982 年掺钛蓝宝石晶体问世以来,用其作为增益介质的激光系统,其输出激光脉宽不断的缩短,从皮秒到飞秒;峰值功率由瓦提高到太瓦以至帕瓦。

目前,世界上只有美国晶体系统公司可以提供直径大于 $\phi 80 \text{ mm}$ 的高质量掺钛蓝宝石晶体,他们

可提供的最大尺寸为 $\phi 100$ mm。在我国,只有中国科学院上海光学精密机械研究所晶体中心可以提供大尺寸优质的掺钛蓝宝石晶体,目前可以提供符合要求的 $\phi 50$ mm 优质激光晶体,采用 TGT 法生长的晶体毛坯尺寸可以达到 $\phi 120$ mm。另外,中国科学院上海光学精密机械研究所也可提供 $\phi 80$ mm 的优质钛宝石激光晶体。

参 考 文 献

- 1 B. Henderson, R. H. Bartram. Crystal-Field Engineering of Solid-State Laser Materials [M]. Cambridge University Press, 2000. 326
- 2 Gan Fuxi. Information Materials[M]. Tianjin: Tianjin University Press, 2003. 620~632
干福熹. 信息材料[M]. 天津: 天津大学出版社, 2003. 620~632
- 3 Cao Dongmao, Ren Haoyu, Yang Zhiyong *et al.*. Femtosecond, terawatt level Ti:Sapphire laser system[J]. *Appl. Opt.*, 2000, **21**(2):7~12
曹东茂,任兆玉,杨志勇等.飞秒、太瓦级钛宝石激光系统[J]. 应用光学, 2000, **21**(2):7~12
- 4 Deng Peizhen. Ti:sapphire crystal used in ultra fast lasers and amplifiers[J]. *J. Infrared Millim. Waves*, 2002, **21**(Suppl.):41~44
邓佩珍. 研制超高功率激光系统所需得优质大尺寸钛宝石晶体(Ti³⁺:Al₂O₃)[J]. 红外与毫米波学报, 2002, **21**(Suppl.):41~44
- 5 M. R. Kokta. *Tunable Solid State Laser*[M]. New York, 1987. 89
- 6 C. P. Khattak, A. N. Scoville. Growth of laser crystals by heat exchange method (HET)[C]. *SPIE*, 1986, **681**:58~61
- 7 Zhou Yongzong. The TGT growth devices for high-temperature crystals[P]. Chinese patent apply No. 85100534.9, 1985
周永宗. 一种高温氧化物晶体的生长装置[P]. 中国专利. 专利号: 85100534.9, 1985