

# 大口径钛宝石晶体全频域透射波前误差高精度加工工艺研究

金寿平<sup>1</sup>, 付跃刚<sup>1\*</sup>, 金钰皓<sup>2</sup>, 郝志旭<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022;

<sup>2</sup> 太原理工大学, 山西 太原 030024

**摘要** 钛宝石晶体是超强、超短脉冲激光振荡源广泛采用的工作物质,其口径大小和表面全频域波面误差决定了超短、超强激光系统的输出能量和光束质量,然而由于大口径钛宝石晶体光学均匀性差及硬度高的特点,其实现高精度透射波前和超光滑表面加工很具挑战性。针对这一问题,设计了线偏振干涉光源检测方法,解决了钛宝石晶体双折射导致的透射波前检测干涉条纹无法解析的问题;基于对钛宝石晶体材料光学均匀性的检测分析,发展了基于单轴机的透射波前快速抛光收敛工艺;通过正交实验和灰关联分析法,利用小磨头抛光工艺实现了钛宝石晶体高精度透射波前低频误差和超光滑表面高频误差的加工;为改善中频误差,发展了基于硅溶胶抛光液的小磨头中频误差光顺工艺。实验结果表明:多手段组合的加工工艺可以实现大口径钛宝石晶体全频域透射波前误差的有效控制,针对直径为 120 mm 的钛宝石样件,透射波前峰谷值可达  $0.283\lambda$  ( $\lambda=632.8$  nm),中频功率谱密度无明显的特定频段调制误差,高频表面粗糙度  $R_q$  约为 0.262 nm,可达到超光滑量级。

**关键词** 材料; 钛宝石晶体; 透射波前; 超光滑表面

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.0903002

## High-Precision Transmission-Wavefront-Processing Technology of Large Aperture Ti:sapphire Crystal at Full Spatial Frequency

Jin shouping<sup>1</sup>, Fu Yuegang<sup>1\*</sup>, Jin Yuhao<sup>2</sup>, Hao Zhixu<sup>1</sup>

<sup>1</sup> School of Opto-Electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China;

<sup>2</sup> Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi 030024, China

**Abstract** Ti:sapphire crystal is a widely-used working material for ultra-short and ultra-intense laser oscillator. Its aperture and surface full-spatial-frequency wavefront errors determine the output energy and beam quality of ultra-short and ultra-intense laser system. However, owing to the extreme difficulty in obtaining good optical homogeneity and high Mohr hardness in the Ti:sapphire crystal, it remains a great challenge to fabricate a large-aperture Ti:sapphire with a high-precision transmission wavefront and super-smooth surface. High-precision transmission-wavefront measurements of the Ti:sapphire crystal are realized through the design of a linear polarization interference detection method to match the crystal axis, which solves the problem that the interference fringes of transmission-wavefront measurements cannot usually be resolved owing to the birefringence caused by the structural characteristics of the Ti:sapphire crystal. Based on the measurements and analysis on the optical homogeneity of the Ti:sapphire crystal, a fast polishing convergence process for the transmission wavefront is developed using an uniaxial machine. In order to realize the process for transmission wavefront with high accuracy and low frequency error and the process for super-smooth surface with high frequency error, orthogonal experiments combined with the grey relational analysis method are used to optimize the processing parameters of a computer-controlled small-grinding-head polishing. A small-grinding-head smoothing process using silica sol polishing fluid is developed to reduce the mid-spatial-frequency errors. Experimental results show that the transmission-wavefront

收稿日期: 2019-03-11; 修回日期: 2019-04-11; 录用日期: 2019-05-13

基金项目: 国家自然科学基金(61705018)

\* E-mail: fuyg@cust.edu.cn

errors of the large-aperture Ti:sapphire crystal at full spatial frequency can be effectively controlled by using multi-way processing technologies. For a large-aperture Ti:sapphire crystal with a diameter of 120 mm, the peak-valley value of the transmission wavefront can reach  $0.283\lambda$  ( $\lambda = 632.8$  nm), the power spectral density of intermediate frequency shows that there is no obvious error modulation at special frequency. A super-smooth surface is realized with a high-frequency roughness  $R_q$  of approximately 0.262 nm.

**Key words** materials; Ti:sapphire crystal; transmission wavefront; super-smooth surface

**OCIS codes** 160.3380; 240.5450

## 1 引 言

钛宝石晶体具有宽带可调谐(最宽 660 ~ 1200 nm)、受激发射截面大、吸收带宽和物化性能优良等诸多优点,是超强、超短脉冲激光振荡源工作物质的首选<sup>[1-8]</sup>。当前世界上多个国家都在规划建设数 PW 级的超短、超强激光实验装置,作为装置中的核心元件,钛宝石晶体不仅需要具备大口径,以支撑大能量的输出,还要具备良好的面形精度以及超光滑的表面粗糙度,同时还需要满足严苛的中频误差要求以及激光损伤相关的低缺陷控制要求,这给加工技术带来了很大挑战。

一方面由于材料制备工艺的特殊性,大尺寸钛宝石晶体的生长会导致其光学均匀性较差,而基于单轴机和环抛机的全口径加工工艺又很难局部修正材料光学均匀性引起的局部透射波前畸变,导致低频面形难以达标。美国劳伦斯利佛摩尔国家实验室为提升大口径钛宝石晶体透射波前的加工精度,发展了钛宝石晶体透射波前高精度加工的磁流变抛光工艺<sup>[9]</sup>。虽然磁流变等基于计算机控制的子孔径抛光技术可以局部修正光学均匀性引起的透射波前畸变,实现高精度的低频面形,但由于子孔径抛光技术使用了比工件小得多的抛光磨头,会在晶体表面残留小尺度波纹,小尺度波纹引起的中频误差会在强激光系统中非线性地调制激光强度,劣化激光系统输出的光束质量,从而限制激光系统的输出能力。在高功率激光系统中这种误差是不可容忍的,必须予以严格控制<sup>[10]</sup>。当前,为实现光学元件的全频域波前误差的高精度控制,组合加工工艺是个有效的手段<sup>[11]</sup>。

另一方面,钛宝石晶体是典型的硬脆难加工材料<sup>[12-13]</sup>,是自然界中仅次于金刚石、立方氮化硼的第三大硬脆材料,这类材料的弹性极限与强度极限非常接近,当材料所承受的载荷稍稍超过弹性极限时,就会发生断裂破坏,难以实现塑性域加工;同时,由于其化学性质非常稳定,仅在 250 °C 以上的高温条件下才能溶于某些酸性物质,在正常的研磨和抛光

条件下无明确的化学反应发生,加工过程中主要依靠磨料的机械作用进行材料的去除,因此加工表面容易产生微裂纹和凹坑等加工缺陷,为其超低表面粗糙度和表面疵病控制带来了困难。当前,国内针对面向高功率激光应用的钛宝石晶体透射波前全频域波面误差的高精度、超光滑加工问题尚缺乏系统深入的研究,鉴于此,本文从钛宝石晶体的结构特性和光学均匀性出发,提出了解决钛宝石晶体高精度透射波前检测的正交偏振干涉检测方法,系统地开展了基于单轴机快速粗抛、数控小磨头精密、超光滑抛光以及光顺等多手段组合的抛光工艺优化研究,通过综合利用树脂铜盘、聚氨酯抛光盘以及钻石粉、硅溶胶等抛光液,建立了大口径钛宝石晶体高精度透射波前误差的高精度、超光滑、低缺陷加工工艺路线,并基于该工艺路线,对直径为 120 mm 的钛宝石晶体的高精度、超光滑、低缺陷加工进行了实验验证。

## 2 实验设计

### 2.1 钛宝石晶体的加工工艺实验

实验样品选择直径为 120 mm、厚度为 28 mm 的钛宝石晶体,如图 1 所示。其加工全流程包括研磨、粗抛、精抛和光顺。在研磨阶段,采用传统单轴机对样件的两个单面进行快速研磨,达到要求的尺寸精度。由于钛宝石晶体的莫氏硬度为 9,一般的磨料无法对其进行加工,因此,采用金刚石微粉和铸铁盘结合研磨的方式进行粗磨。研磨液采用粒径为 20  $\mu\text{m}$  的金刚石微粉散粒磨料和去离子水配制而成,磨料的质量分数为 10%。在精磨阶段,为了控制研磨过程中的表面缺陷,研磨盘采用铝盘,研磨液采用粒径为 10  $\mu\text{m}$  的金刚石微粉散粒磨料和去离子水配制而成,磨料的质量分数为 10%。在粗抛阶段,利用金刚石微粉和树脂铜盘对两单面进行快速抛亮,以快速去除研磨产生的亚表面缺陷,并保证较低的表面粗糙度,抛光液由 UNIVERSAL PHOTONICS 公司生产的粒径为 2.0  $\mu\text{m}$  的金刚石微粉和去离子水配制而成,微粉的质量分数为 2%。在精抛阶段,继续采用单轴机,使用聚氨酯盘和

2.0  $\mu\text{m}$ 的金刚石微粉抛光液进行细抛光,以实现反射面形的精确控制,然后通过聚氨酯盘和粒径为0.1  $\mu\text{m}$ 的硅溶胶原液进行抛光,以去除其表面的少量亮丝。在上述不同加工阶段,单轴机采用的加工工艺参数如表 1 所示。



图 1 Ti:sapphire 晶体  
Fig. 1 Ti:sapphire crystal

由于钛宝石晶体材料的光学均匀性较差,仅仅利用单轴机或环形抛光机难以局部修正光学均匀性引起的局部透射波前畸变。为了实现透过波前指标,采用数控小磨头对透射波前进行精修,在小磨头抛光阶段,首先使用树脂铜盘和金刚石微粉进行粗抛光,实现面形的较快收敛,再使用聚氨酯盘和金刚石微粉进行精抛光,实现透射波前的精确控制。为实现晶体的超光滑、低缺陷加工,基于数控小磨头工艺,设计了正交实验并运用灰色关联分析法优化工艺参数。小磨头(CCOS)加工工艺参数如表 2 所示。最后,为了改善小磨头加工后残留的中高频误差,利用小磨头光顺工艺,在保证透射波前的前提下,采用铜盘结合硅溶胶原液进行光顺加工,实现钛宝石晶体中高频误差的有效控制,从而实现超光滑、低缺陷表面的加工。

表 1 单轴机研磨和抛光实验参数

Table 1 Experimental parameters of grinding and polishing of single-spindle machine

Proces	Abrasives	Abrasive disc ( $\Phi 120$ mm)	Diameter size / $\mu\text{m}$	Time /min	Speed / ( $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ )	Force /N
Grinding	Diamond powder	Iron plate	20.0	30	35	10
	Diamond powder	Aluminum plate	10.0	40	35	5
Rough polishing	Diamond powder	Resin copper plate	2.0	120	30	5
Fine polishing	Diamond powder	Polyurethane plate	2.0	120	25	2.5
	Silica sol	Resin copper plate	0.1	20	25	2.5

表 2 小磨头抛光实验参数

Table 2 Experimental parameters of small-grinding-head polishing

Process	Lapping and polishing plate	Abrasives	Diameter size / $\mu\text{m}$	Time / min	Pressure / Pa	Revolution / ( $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ )	Rotation / ( $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ )
Rough polishing	Resin copper plate	Diamond powder	2.0	970	10000	50	100
Fine polishing	Polyurethane plate	Diamond powder	2.0	770	5000	40	90
Super smooth	Resin copper plate	Silica sol	0.1	60	5000	0	125

## 2.2 透射波前检测分析

为了实现高精度透射波前的加工,首先要解决的是检测问题<sup>[14-17]</sup>。钛宝石为单轴晶体,其某一波矢方向对应两条光线: o 光和 e 光,两者的矢量互相垂直,其电场振动矢量也彼此垂直。对于晶体的高精度透射波前检测,若采用一般的干涉仪检测,由于检测光为圆偏振光,光透射晶体后将产生双折射

现象,通过干涉仪后分别得到光的偏振方向平行于 o 轴和 e 轴时的全口径干涉图,用干涉仪测量的晶体透射波前  $\phi$  的分布与晶体折射率  $n$ 、晶体厚度  $L$ 、干涉仪的工作波长  $\lambda_p$  满足

$$\phi(x, y) = n(x, y)L(x, y)/\lambda_p, \quad (1)$$

对(1)式求微分可以得到

$$\delta\phi(x, y) = [n_a \delta L(x, y) + L_a \delta n(x, y)]/\lambda_p, \quad (2)$$

式中:带有下标 a 的量表示该物理量的测量平均值。

将 o 光与 e 光干涉相位叠加后可以得到

$$\Phi = \phi_o + \phi_e = [(n_{ao} + n_{ae})\delta L + \delta(n_o + n_e)L]/\lambda_p. \quad (3)$$

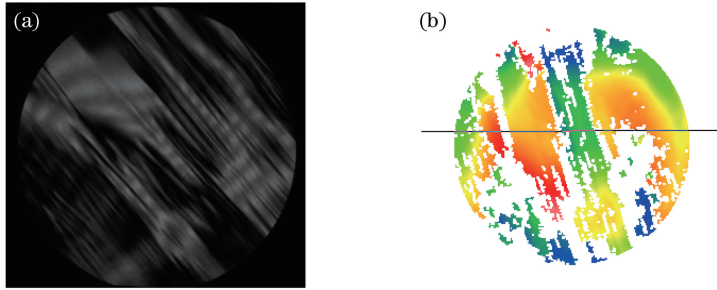


图 2 检测光透射晶体后产生的双折射导致干涉条纹不能解析的现象。(a)干涉条纹图;(b)透过波前图

Fig. 2 Phenomenon that interference fringes cannot be resolved due to birefringence produced by detection light transmitted from crystal. (a) Interference fringe; (b) transmission wavefront

为实现对钛宝石晶体透射波前的有效检测,本文考察了其在激光链路中的实际使用状态,如图 3 所示。

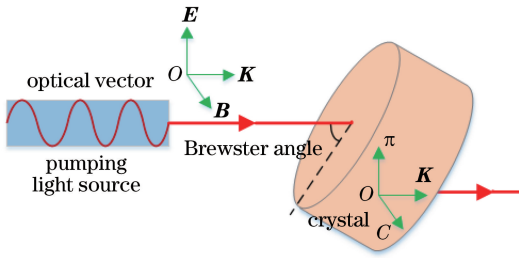


图 3 钛宝石晶体的使用示意图

Fig. 3 Schematic of using Ti:sapphire crystal

进一步分析发现钛宝石晶体的使用与其光谱特性密切相关,钛宝石晶体的吸收光谱见文献[18]。从钛宝石的吸收光谱可以看出,钛宝石晶体的主吸收谱范围在蓝绿激光区域内,吸收光谱有较强的偏振特性:光的电场矢量与 C 轴平行时,表现为  $\pi$  吸收峰;光的电场矢量与 C 轴垂直时,表现为  $\sigma$  吸收峰。钛宝石晶体的荧光谱也存在很强的偏振特性,  $\pi$  偏振光的强度大于  $\sigma$  偏振光,晶体荧光谱线的这种偏振特性使得激光器的振荡光容易实现偏振输出。因此,在实际使用过程中,为了使晶体最有效地吸收抽运光,抽运光的波矢  $K$  垂直于  $\pi$  轴,电场矢量  $E$  平行于  $\pi$  轴,磁感应强度  $B$  与之垂直,即  $\pi$  偏振方向抽运,从而实现腔内基频光以  $\pi$  偏振的方式起振,这样光就能几乎无损耗的透射,同时自动抑制  $\sigma$  偏振基频光的起振。

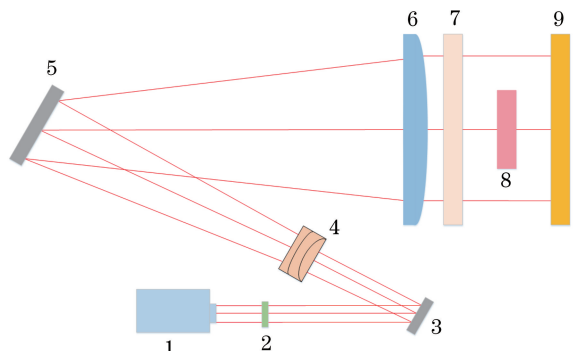
基于以上分析,考虑到钛宝石晶体的工作状态,对钛宝石晶体进行透射波前检测的干涉光源必须采

此时 o 光和 e 光分别形成的干涉条纹互相干扰,导致干涉条纹无法有效解析,难以实现透射波前检测。图 2 为钛宝石晶体在实际加工过程中因检测方法不当而导致干涉条纹无法有效解析的结果。

用线偏振光,并且需要调整其偏振方向垂直于通光方向且平行于 C 轴,这样可避免出现双折射现象。

### 2.3 透射波前检测方案

依据上述对钛宝石晶体实际使用状态的分析,针对干涉仪本身输出的激光束不具有线偏振特性,而且不可能在干涉仪内部加入光学元件,考虑在干涉仪外部加入可以改变光束偏振方向的光学元件,本文采用起偏器和检偏器产生确定方向的线偏振光。因为 Fizeau 干涉仪具有共光路的优点,因此将起偏器加到透射标准镜与反射标准镜之外可以有效降低附加光学元件对测量结果的影响,分析检测采用的 24 英寸(1 英寸=2.54 cm)大口径干涉仪的光路结构,在干涉仪主机后和第一块转折镜前的出光口处的合适位置插入线偏振器,该位置如图 4 中的 2 所示。线偏光镜(LP)安装在可以 360° 旋转的调整架上,通过旋转偏振片来改变输出激光束的线偏



1: interferometer; 2: linear polarizer (LP); 3: reflective mirror; 4: secondary lens kits; 5: reflective mirror; 6: collimator lens; 7: transmission standard mirror; 8: Ti:sapphire crystal; 9: reflective standard mirror

图 4 正交偏振检测系统

Fig. 4 Schematic of orthogonal polarization detecting system



振方向,使其平行于钛宝石晶体的 C 轴,从而避免了双折射现象,实现了晶体透射波前的测量。

### 3 实验结果

根据正交偏振检测方案,首先利用四步法对钛宝石晶体样件进行光学均匀性检测,计算可得样件材料的折射率光学均匀性约为  $53 \times 10^{-6}$ 。钛宝石晶体的透射波前误差的计算可表示为

$$T = S_1 + \Delta n(x, y) \cdot t + S_2 + C', \quad (4)$$

式中: $T$  为透射波前; $t$  为工件的厚度; $C'$  为空洞面形; $\Delta n(x, y)$  为折射率均匀性; $S_1$  为单面的反射面形; $S_2$  为透射  $S_1$  面至  $S_2$  面的反射面形。可以看出,透射波前取决于该元件两个单面的面形误差、材料的均匀性以及干涉仪空腔的面形误差<sup>[19-22]</sup>。

由(4)式计算可得样件本身折射率光学均匀性引起的透射波前畸变已超过  $2\lambda$  ( $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ , 下同),如图 5 所示。若直接将两面的面形加工好,就会无法实现高精度透射波前指标。从图 5 的面形分布可以看出,由于该材料的光学均匀性分布为中心对称分布,透过面形畸变主要为 POWER,因此,在粗抛阶段利用单轴机对透过面  $S_2$  中的低频误差进行大去除量加工,实现对 POWER 误差的有效抑制,进而完成透过波前的快速粗抛修正。这是由于单轴机在全局对称误差的加工效率远高于小磨头,可以避免采用数控小工具大量去除材料后引入过多的中高频误差,影响后续的光顺效率。利用单轴机粗抛完成的两个单面的面形如图 5 所示。

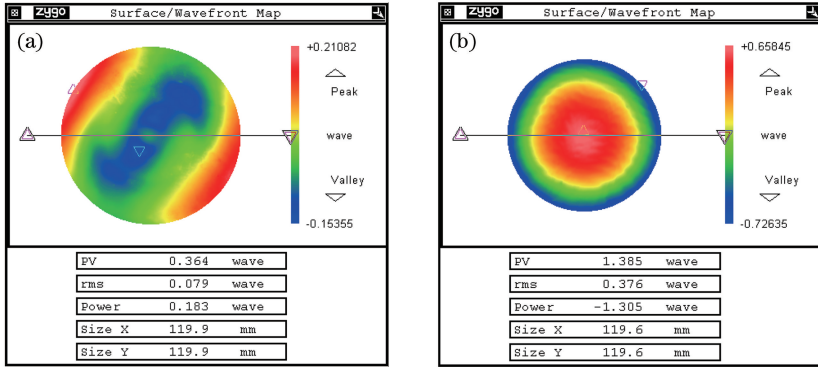


图 5 单轴机粗抛后两面的面形精度。(a)  $S_1$  面粗抛后的面形精度;(b)  $S_2$  面粗抛后的面形精度

Fig. 5 Two sides of surface accuracy after rough polishing by single-spindle machine. (a) Surface accuracy of side  $S_1$  after rough polishing; (b) surface accuracy of side  $S_2$  after rough polishing

在粗抛期间,由于采用树脂铜盘抛光的过程是将铜盘的面形复制到待加工元件表面的过程,需保证铜盘的平面度优于  $1 \mu\text{m}$ ,因而粗抛加工前要修整铜盘。利用铸铁盘(直径为  $150 \text{ mm}$ )、303 # 金刚砂与铜盘(直径为  $120 \text{ mm}$ )相互研磨,进行铜盘面形的修整,该阶段需使铜盘的平面度达到  $2 \sim 3 \mu\text{m}$ ,然

后采用沥青盘(直径为  $150 \text{ mm}$ )和  $\text{Al}_2\text{O}_3$  抛光液进行抛光,结合条纹干涉仪和数字干涉仪测得铜盘的面形为  $0.846\lambda$ ,检测结果如图 6(b)所示。在实际抛光使用时,铜盘边缘需倒钝,以防止锋利的边缘划伤表面。由于铜盘的硬度小于晶体,因此,随着抛光时间延长,铜盘面形会发生变化。因此,抛光一定时间

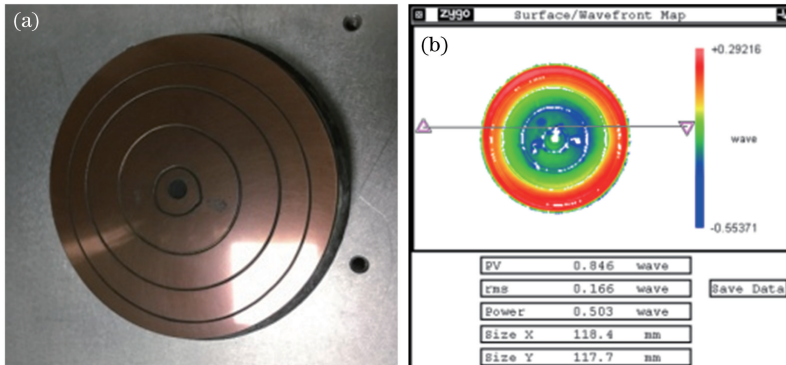


图 6 铜盘的抛光效果。(a) 抛光后的铜盘;(b) 铜盘的面形

Fig. 6 Polishing results of copper pad. (a) Copper pad after polishing; (b) surface of copper pad

后,需重新修改铜盘,以提高抛光效率及精度。

单轴机粗抛后,晶体因光学均匀性引起的透过波前的 POWER 误差得到了有效抑制,低频误差收敛至  $0.618\lambda$ ,测试结果如图 7 所示。从图 7 可以看出,低频面形误差主要由于残余的局部误差引起,这种误差可以利用数控小磨头等子孔径抛光方法进行修正。

图 8(a)为利用美国 Zygo 公司的 Newview 7200 白光轮廓仪检测的单轴机粗抛后的表面粗糙度(空间频段范围为  $0.01\sim 0.12\text{ mm}$ ),由于采用金刚石微粉进行粗抛时表面磨削的主要作用为机械作用,因而从图 8(a)中还是可以看出表面有细小的亮路和麻点等缺陷,表面粗糙度均方根(RMS)约  $4.7\text{ nm}$ 。为改善表面粗糙度,在精抛阶段采用纳米

金刚石微粉进行机械抛光,使表面粗糙度收敛至  $1\text{ nm}$ 左右,如图 8(b)所示,但划痕仍然存在。

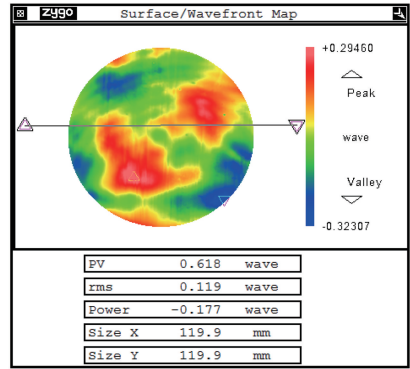


图 7 单轴机粗抛后的透过波前测量结果

Fig. 7 Measurement results of transmission wavefront of sample after rough polishing by single-spindle machine

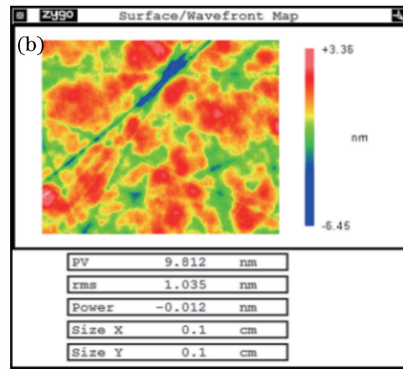
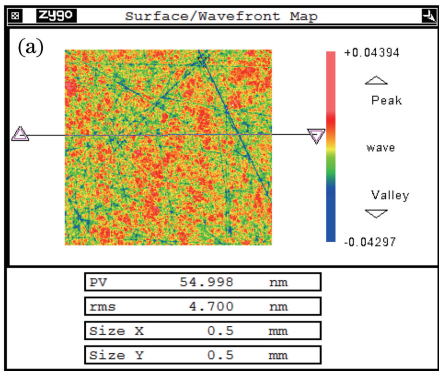


图 8 样品表面粗糙度的检测结果。(a)样品经粗抛后的表面粗糙度;(b)样品经精抛后的表面粗糙度

Fig. 8 Measurement results of surface roughness of sample. (a) Surface roughness of sample after rough polishing; (b) surface roughness of sample after fine polishing

为进一步提升钛宝石晶体的透射波前精度、改善晶体表面粗糙度和降低表面缺陷,使其满足强激光系统的使用要求,采用正交实验及灰色关联分析法对数控小磨头的加工工艺进行优化,分析了抛光盘种类、抛光盘转速、抛光盘压力及硅溶胶浓度对晶

体表面粗糙度和疵病的影响规律。实验中主要将抛光盘、抛光压力、抛光盘转速、硅溶胶浓度作为主要的影响因素,每个因素选取了三个水平,如表 3 所示。实验结果如表 4 所示。

表 3 正交实验因素和水平分布表

Table 3 Orthogonal experimental factors and horizontal distribution table

Factor	Polishing plate(A)	Pressure (B) /Pa	Rotational speed (C) /( $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ )	Silica sol concentration (D)
Level 1	Resin copper plate	5000	100	1:1
Level 2	Pitch lap	6000	125	2:1
Level 3	Polyurethaneplate	8000	150	4:1

对表 4 的正交实验结果进行极差分析,结果如表 5 所示。可以发现:各因素对表面粗糙度 RMS 的影响程度从大到小的顺序为抛光盘种类、硅溶胶稀释浓度、抛光盘压力、抛光盘转速;各因素对表面疵病的影响程度从大到小的顺序为抛光盘压力、抛光盘种类、抛光盘转速或硅溶胶稀释浓度。

从以上的分析可以看出,钛宝石晶体表面粗糙度和表面疵病率是互不相关的,很难同时将两个指标同时优化。

灰色系统理论提出了对各指标进行灰色关联分析的概念,通过计算寻求各因素之间的变化关系,对系统中的各指标及因素的动态变化提供了定量比

较,非常适合用于分析钛宝石晶体加工中表面粗糙度和表面疵病的参数优化。

表 4 正交实验方案及结果

Table 4 Orthogonal experimental scheme and results

Serial number	A	B	C	D	RMS /nm	Defect rate (10 <sup>-3</sup> mm <sup>-1</sup> )
1	1	1	1	1	0.380	1.6
2	1	2	2	2	0.401	2.2
3	1	3	3	3	0.525	2.4
4	2	1	2	3	0.812	1.6
5	2	2	3	1	0.717	1.8
6	2	3	1	2	0.977	2.0
7	3	1	3	2	0.995	1.8
8	3	2	1	3	1.117	2.6
9	3	3	2	1	1.000	2.8

表 5 极差分析结果

Table 5 Results of range analysis

Factor	A	B	C	D
RMS	0.427	0.105	0.087	0.119
Defect rate	0.47	0.64	0.13	0.13

运用灰色关联分析法对抛光参数进行优化,经归一化处理后确定目标参考序列以及灰色关联度,计算结果如表 6 所示。

表 6 灰关联分析度计算结果

Table 6 Calculation results of grey relational analysis degree

Factor	Level	Greyrelational coefficient		Grey relational degree
		RMS	Defect	
A	1	0.919	0.7	0.81
	2	0.554	0.836	0.695
	3	0.458	0.573	0.516
B	1	0.679	0.938	0.809
	2	0.671	0.63	0.651
	3	0.581	0.541	0.561
C	1	0.637	0.723	0.68
	2	0.665	0.696	0.681
	3	0.629	0.71	0.67
D	1	0.697	0.748	0.723
	2	0.64	0.703	0.672
	3	0.594	0.658	0.626

从表 6 中可以看出:抛光盘种类的灰色关联度从大到小的顺序为 A1、A2、A3;抛光盘压力的灰色关联度从大到小的顺序为 B1、B2、B3;转速 C2 最大,因此抛光盘转速选用 125 r/min 时最佳;硅溶胶稀释浓度的灰色关联度从大到小的顺序为 D1、D2、D3,即硅溶胶稀释浓度在 1:1 时最佳。综合考虑钛宝石晶体的表面粗糙度和表面疵病,选择最佳的加

工工艺参数组合为:铜盘、抛光盘压力为 0.5 MPa,抛光盘转速为 125 r/min,硅溶胶加水按体积比 1:1 稀释。按照参数优化后的工艺进行验证性实验,实验结果显示,钛宝石晶体的表面粗糙度  $R_q$  为 0.262 nm,如图 9 所示,且钛宝石晶体表面的划痕得到了有效抑制。

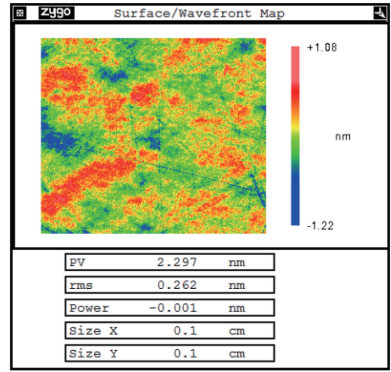


图 9 钛宝石晶体的表面粗糙度

Fig. 9 Surface roughness of Ti:sapphire crystal

考虑到数控小工具加工的边缘效应和元件实际使用过程中的工艺边,钛宝石样件在精密抛光和光顺阶段测量的有效口径统一为 100 mm,钛宝石样件经数控小工具精密抛光后的低频误差峰谷值(PV 值)达到了  $0.272\lambda$ ,如图 10(a)所示。

数控小工具抛光后往往会引入中频误差,这些残留的表面波前误差是影响激光光束质量的主要因素之一。功率谱密度( $P_{SD}$ )函数是一个关于空间频率的函数,它可将空间波形信息通过傅里叶变化转变成频域信息,从而能够形象地描述空间频率范围内某一频率处的波前误差。为描述数控小工具精密抛光后钛宝石样件的中频误差,对功率谱密度进行了计算,干涉仪得到的面形图即为表面的高度图  $h(x, y)$ ,进行傅里叶变化后即得高度图的频谱<sup>[23]</sup>,表示为

$$\tilde{H}(u, v) =$$

$$\int_{-b/2-a/2}^{b/2} \int_{-a/2}^{a/2} h(x, y) \exp[-2\pi/(ux + vy)] dx dy, \quad (5)$$

$$\tilde{H}(u_m, v_n) = \mathcal{F}\{h(x_m, y_n)\} \Delta x \Delta y, \quad (6)$$

式中: $x$  和  $y$  分别为水平和垂直方向上的表面位置变量; $u$  和  $v$  分别为水平和垂直方向上的空间频率变量; $\mathcal{F}$  表示二维快速傅里叶计算; $u_m$  和  $v_n$  分别为水平和垂直方向上离散化的空间频率; $y_n$  为水平和垂直方向上离散化的表面位置。参数  $a$  和  $b$  是表面高度图总的宽度和高度。对于二维功率谱密度,可以在表面高度图频谱中将其表示为单位面积振幅的

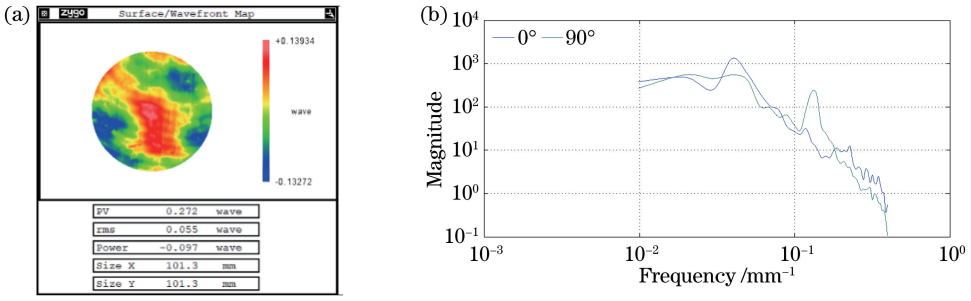


图 10 小磨头精密抛光结果。(a)小磨头精密抛光后样件的透过波前;(b)中频功率谱密度(空间周期为 2.5~33 mm)  
Fig. 10 Results of fine polishing by small grinding head. (a) Transmission wavefront of sample after fine polishing by small grinding head; (b) power spectral density at mid-spatial frequency (spatial period is 2.5-33 mm)

平方 A。因此,功率谱密度可以表述为

$$P_{SD}(u, v) = \frac{1}{A} |\tilde{H}(u, v)|^2 = \frac{1}{ab} \left| \int_{-b/2-a/2}^{b/2} \int_{-a/2}^{a/2} h(x, y) dx dy \right|^2. \quad (7)$$

依据(7)式计算得到的中频功率谱密度如图 10(b)所示,空间频段范围为 2.5~33 mm,空间周期 2.5 mm 下限的选择是由测量所用的干涉仪决定。本文所用干涉仪的口径为 600 mm, CCD 阵列为 1000×1000,对应的最小额横向和纵向空间分辨率均约为 0.6 mm。为保证测量值可信且有效滤波,空间尺寸至少包含 3~4 个像素点,本文选取了 4 个像素点,因此下限选了 2.5 mm。参照美国国家点火装置对元件中频段的划分选取上限值为 33 mm,因为其定义的中频段空间波长的上限为 33 mm<sup>[10]</sup>。从图 10(b)中可以看出,经过数控小工具修形后,功率谱密度曲线上明显出现了中频误差调制特征峰。

针对数控小工具加工导致的中频误差,光顺加工是一种有效的抑制手段<sup>[24-25]</sup>。为此,对小磨头精密抛光后的样件进行了光顺加工,光顺盘的选择参照单轴机的原理,其直径为工件直径的 80%,光顺加工方式为工件主轴转动,光顺盘自转加平动,平动偏心量为 30 mm。具体的光顺加工参数如表 7 所示,光顺加工过程示意如图 11 所示。

光顺后钛宝石样品的高精度低频误差基本上没有被破坏, PV 值达到了约 0.239λ,同时周期性波纹被有效去除,功率谱密度得到显著抑制,如图 12 所示。光顺后低频 PV 变化与中高频误差的分布密切相关,由于采用了 CCOS 小工具修形,故可能存在许多局部小区域残留误差,导致有个别高点,经过光顺后,局部中高频误差被平滑, PV 可能会有所下降;但若过度光顺,低频误差累积后,低频 PV 就会变大。因此,针对钛宝石样品,利用光顺工艺可以在

保持低频面形误差不恶化的情况下,有效去除小工具修形引起的中高频误差。

表 7 小磨头的光顺参数

Table 7 Smoothing parameters of small grinding head

Parameter	Content
Polishing plate	Resin copper plate
Abrasives	Silica sol
Diameter size / μm	0.1
Pressure / Pa	5000
Rotating speed of smoothing plate / (r·min <sup>-1</sup> )	42
Rotation speed of C-spindle / (r·min <sup>-1</sup> )	33
Moving range / mm	-30 to 30
Moving speed / (mm·min <sup>-1</sup> )	273
Time / min	7.3

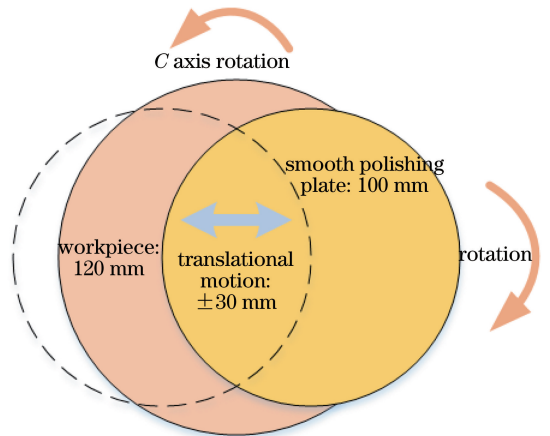


图 11 光顺加工过程示意图

Fig. 11 Schematic of smoothing process

## 4 结 论

本文针对钛宝石晶体加工和检测的难题,分析了晶体双折射对透射波前检测带来的影响,利用线偏振激光干涉检测光源解决了晶体双折射效应导致的干涉条纹不能有效解析的问题,实现了晶体透射



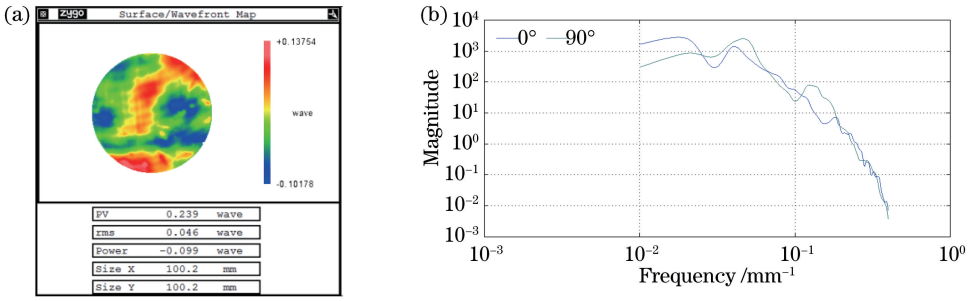


图 12 光顺加工结果。(a)光顺加工后钛宝石样件的透过波前;(b)光顺加工后的功率谱密度(空间周期为 2.5~33 mm)  
Fig. 12 Results of smoothing. (a) Transmission wavefront of Ti:sapphire sample after smoothing;  
(b) power spectral density after smoothing (spatial period is 2.5-33 mm)

波前的精确检测。针对钛宝石晶体的物理、化学性质,利用正交实验和灰度关联分析法,开展了钛宝石晶体小磨头低缺陷、超光滑工艺加工研究,获得了钛宝石低缺陷、超光滑抛光过程中不同工艺参数的影响规律,使钛宝石晶体表面达到了超光滑量级。通过不同加工阶段研抛盘的设计和抛光辅料的选择,优化并耦合传统抛光、数控小工具抛光以及光顺工艺参数,成功实现 PV 值优于  $0.239\lambda$  ( $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ ) 大尺寸钛宝石晶体元件的透射波前,且实现了中频功率谱密度的有效控制。

### 参 考 文 献

[1] Huang C P, Nathel H, Asaki M T, *et al.* 17-fs pulses from a self-mode-locked Ti:sapphire laser[J]. Optics Letters, 1992, 17(18): 1289-1291.

[2] Zhang B H, Xu J, Yang Q H, *et al.* New progress of ultrafast and ultraintense lasers based on Ti:sapphire [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(4): 040003.  
张宝辉, 徐军, 杨秋红, 等. 基于钛宝石的超快超强激光新进展[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(4): 040003.

[3] Nisoli M, de Silvestri S, Svelto O, *et al.* Compression of high-energy laser pulses below 5 fs[J]. Optics Letters, 1997, 22(8): 522-524.

[4] Liu J, Wang Y Z, Zhao R R, *et al.* Low vibration and high dispersion mirror pair in femtosecond pulsed Ti:sapphire laser [J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(10): 1003001.  
刘加, 王胭脂, 赵睿睿, 等. 飞秒脉冲钛宝石激光器中的低振荡高色散镜对[J]. 中国激光, 2018, 45(10): 1003001.

[5] Zhang L P, Yin G L, Li F Q, *et al.* All-solid-state tunable Ti:sapphire laser with high-power and single-frequency at 900 nm[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(12): 1201002.  
张连平, 殷国玲, 李凤琴, 等. 900 nm 波段的全固态

高功率单频可调谐钛宝石激光器[J]. 中国激光, 2017, 44(12): 1201002.

[6] Morgner U, Kärtner F X, Cho S H, *et al.* Sub-two-cycle pulses from a Kerr-lensmode-locked Ti:sapphire laser[J]. Optics Letters, 1999, 24(6): 411-413.

[7] Su J, Jin P X, Wei Y X, *et al.* Automatically and broadly tunable all-solid-state continuous single-frequency Ti:sapphire laser [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(7): 0701006.  
苏静, 靳丕钰, 卫毅笑, 等. 自动宽调谐的全固态连续单频钛宝石激光器[J]. 中国激光, 2017, 44(7): 0701006.

[8] Liao R, Wen J H, Liu Z G, *et al.* Characterization of sub-10-fs KLM Ti:sapphire laser [J]. Chinese Journal of Lasers, 2002, 29(s1): 53-55.  
廖睿, 文锦辉, 刘智刚, 等. 宽频带亚 10 fs 钛宝石激光器的特性研究[J]. 中国激光, 2002, 29(s1): 53-55.

[9] Schaffers K I, Bayramian A J, Davis P J, *et al.* Improved optical quality for Ti:sapphire using MRF [C]// Advanced Solid-State Photonics 2008, January 27-30, 2008, Nara, Japan. Washington, D. C.: OSA, 2008: WE15.

[10] Baisden P A, Atherton L J, Hawley R A, *et al.* Large optics for the national ignition facility [J]. Fusion Science and Technology, 2016, 69(1): 295-351.

[11] Liao W L, Dai Y F, Nie X Q, *et al.* Rapid fabrication technique for nanometer-precision aspherical surfaces [J]. Applied Optics, 2015, 54(7): 1629-1638.

[12] Wan L L, Dai P, Liu Z J, *et al.* Research progress in ultra-precision lapping process of sapphire [J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2018, 41(1): 115-123.  
万林林, 戴鹏, 刘志坚, 等. 蓝宝石超精密研磨加工研究进展[J]. 兵器材料科学与工程, 2018, 41(1): 115-123.

[13] Geng Q D, Li C Y. Influence of ultrasonic polishing

- and magnetic abrasive finishing processing parameters on surface roughness of sapphire [J]. *Surface Technology*, 2018, 47(7): 104-111.
- 耿其东, 李春燕. 超声磁力研磨加工参数对蓝宝石表面粗糙度的影响[J]. *表面技术*, 2018, 47(7): 104-111.
- [14] Zhang S K, Wang Q Y, Peng H S. Ti:sapphire and ultrashort pulse lasers [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 1997, 9(1): 149-156.
- 张树葵, 王清月, 彭翰生. 掺钛蓝宝石与超短脉冲激光[J]. *强激光与粒子束*, 1997, 9(1): 149-156.
- [15] Lan X J. *Laser technology* [M]. Beijing: Science Press, 2000: 138-140.
- 蓝信钜. *激光技术* [M]. 北京: 科学出版社, 2000: 138-140.
- [16] Wang J C, Deng Q F, Zhou Z Z, *et al.* Review of the methods of surface damage inspection for grinded sapphire substrate [J]. *Superhard Material Engineering*, 2011, 23(5): 51-55.
- 王吉翠, 邓乾发, 周兆忠, 等. 蓝宝石晶片加工表面质量检测方法综述[J]. *超硬材料工程*, 2011, 23(5): 51-55.
- [17] Xu Y C, Lu J, Xu X P. Analysis of power spectrum and fractal characteristics of the surface topography of sapphire[J]. *Superhard Material Engineering*, 2017, 29(2): 56-60.
- 许永超, 陆静, 徐西鹏. 蓝宝石表面形貌的功率谱与分形特征分析[J]. *超硬材料工程*, 2017, 29(2): 56-60.
- [18] Yang X D. *Study on pulse tuned Ti:sapphire laser* [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2006.
- 杨旭东. 脉冲可调谐掺钛蓝宝石激光器的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006.
- [19] Guo P J, Yu J C, Ding Z Z, *et al.* Absolute testing method of the homogeneity of optical glass[J]. *Laser Journal*, 2003, 24(3): 26-27.
- 郭培基, 余景池, 丁泽钊, 等. 光学玻璃光学均匀性的绝对测量技术[J]. *激光杂志*, 2003, 24(3): 26-27.
- [20] de Vany A S. Using a Murty interferometer for testing the homogeneity of test samples of optical materials[J]. *Applied Optics*, 1971, 10(6): 1459-1460.
- [21] Ai C, Wyant J C. Measurement of the inhomogeneity of a window[J]. *Optical Engineering*, 1991, 30(9): 1399-1405.
- [22] Yao C, Wang H, Zhang Z, *et al.* Wavefront error modeling and control method for large aperture optical unit in high power solid-state laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(7): 0714003.
- 姚超, 王辉, 张政, 等. 高功率固体激光器中大口径光学器件波前误差的建模及控制方法[J]. *光学学报*, 2017, 37(7): 0714003.
- [23] Aikens D M, Wolfe C R, Lawson J K. Use of power spectral density (PSD) functions in specifying optics for the National Ignition Facility[J]. *Proceedings of SPIE*, 1995, 2576: 281-292.
- [24] Nie X Q, Li S Y, Shi F, *et al.* Generalized numerical pressure distribution model for smoothing polishing of irregular midspatial frequency errors[J]. *Applied Optics*, 2014, 53(6): 1020-1027.
- [25] Shu Y, Nie X, Shi F, *et al.* Smoothing evolution model for computer controlled optical surfacing[J]. *Journal of Optical Technology*, 2014, 81(3): 164-167.