

## KDP 晶体元件晶轴角度的精密校正

张帅, 金波佳\*, 王翔峰, 雷向阳, 王健, 许乔

中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 成都 610000

**摘要** 大型激光装置要求 KDP(Potassium Dihydrogen Phosphate,  $\text{KH}_2\text{PO}_4$ ) 晶体在加工阶段进行高精度定轴, 以降低后续装调难度, 提升批量装调效率。为此在加工阶段, 提出一种在位检测反馈和多次调节逼近的晶轴角度校正策略, 从原理上避免了校正精度严重依赖调节工装精度、重复装夹误差大、机床直线度引入误差等问题; 并且为提升晶轴角度的校正效率, 研制了电动控制的高精度吸盘角度调节工装, 解决了校正角度大、精度要求高的难题。验证结果表明: 采用研制的高精度吸盘角度调节工装, 经过 3 轮次的迭代, 可以将晶轴角度误差从 2~4 mrad 快速收敛至 20  $\mu\text{rad}$  以内, 满足大型激光装置的要求。所提策略的校正精度仅取决于测头移动长度和测试精度, 且元件口径越大、测量精度越高, 校正精度就越高, 因此所提策略特别适用于大口径 KDP 晶体元件的晶轴角度的精密校正。

**关键词** 光学器件; KDP 晶体元件; 晶轴角度; 金刚石切削; 在位检测; 相位匹配

中图分类号 O439

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202148.0901006

## 1 引言

KDP (Potassium Dihydrogen Phosphate,  $\text{KH}_2\text{PO}_4$ ) 晶体是目前唯一可生长为大口径的非线性光学材料, 因此被广泛应用于惯性约束聚变(ICF)<sup>[1]</sup> 的大型激光驱动器中作为谐波转换单元的终端元件<sup>[2-4]</sup>, 如美国 NIF 装置、法国 LMJ 装置等<sup>[5]</sup>。为了获得高的谐波转换效率, 一般采用角度相位匹配方法<sup>[5-6]</sup>, 使 KDP 晶体晶轴角度(晶面法线与晶体光轴的夹角)等于相位匹配角<sup>[7]</sup>。KDP 晶体元件从生长到使用经历几个阶段: 切片、加工、化学涂膜、装调使用。在切割成片阶段, 晶轴角度定向精度较差, 晶轴角度误差达到毫弧度级, 毫弧度级别的晶轴角度误差若放在装调阶段, 需通过调节晶体姿态进行相位匹配, 增加了装调难度、降低了装调效率, 不利于规模化、批量化装调, 因此大型激光装置要求 KDP 晶体在加工阶段进行高精度定轴。Hawley-Fedder 等<sup>[8]</sup>报道了美国 LLNL 实验室建设的 NIF 装置, 装置要求 KDP 晶体元件晶轴角度误差不大于 20  $\mu\text{rad}$ ; Runkel 等<sup>[9]</sup>进一步提出在半精加工迭代阶段完成晶轴角度校正的要求; Taylor

等<sup>[10]</sup>报道 NIF 装置采用具有三个激光反馈的直立轴调节吸盘。国内对 KDP 晶体的相关研究重点集中于 KDP 晶体在装调使用阶段的面形畸变、支撑方式、温度对相位匹配角的影响和相位匹配角的离线检测<sup>[5, 11-14]</sup>, 还未报道在加工阶段对晶轴角度误差的精密校正。

本文为实现 KDP 晶体在加工阶段的晶轴角度误差精密校正, 提出一种在位检测反馈结合多次调节逼近的校正策略, 以避免校正精度严重依赖调节工装精度、重复装夹误差大、机床直线度引入误差等问题, 实现晶体元件晶轴误差的大角度、高精度的快速校正。

## 2 晶轴校正方法和原理

## 2.1 晶轴角度校正难点分析

最佳匹配角是获得最大效率输出时光束指向与晶轴之间的夹角<sup>[2]</sup>, 理想状态下光束垂直入射至晶体表面, 因此最佳匹配角是理论法线与晶轴之间的夹角  $\beta$ , 如图 1 所示。晶轴角度是晶体表面某处实际法线与晶轴之间的夹角  $\alpha$ , 两者之间的差异便是该处晶轴角度误差  $\theta$ 。 $\theta$  既等于该处理想法线与实

收稿日期: 2020-10-18; 修回日期: 2020-11-17; 录用日期: 2020-11-27

基金项目: 国家自然科学基金(51275115)

\*E-mail: zsbfsj@126.com

际法线之间的夹角,又等于该处实际表面与理想表面之间的夹角。晶轴角度校正的最终目标是通过晶体表面的加工,将晶体实际表面调节至理想表面,使晶体晶轴角度误差为 0。

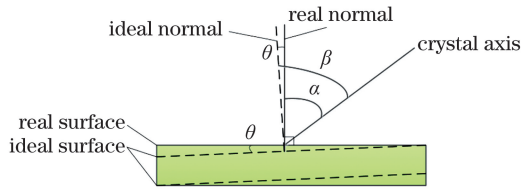


图 1 晶轴角度示意图

Fig. 1 Schematic of crystal axis angle

国际上普遍采用金刚石切削的方式进行 KDP 晶体表面的加工,该方式既可以避免传统抛光中颗粒嵌入的问题,又能够保证晶体两面具有较好的平行度和亚/表面质量。金刚石切削方式的原理如图 2 所示,金刚石刀具随气浮主轴进行高速旋转运动,KDP 晶体元件吸附装夹于真空吸盘,随滑台进行慢速直线进给,此时金刚石刀具便逐刀在晶体表面进行切除,最终新的晶体表面形成。为校正晶体晶轴角度,需先调节吸盘角度来转动晶体,使切削后的晶体表面为理想表面。该过程最为关键的是精确调节吸盘角度使得切削前后表面夹角正好是晶轴角度误差,难点在于调节角度大、精度高,进入晶体加工阶段的晶体的晶轴角度误差有数个毫弧度,最终校正要求却不大于  $20 \mu\text{rad}$ 。考虑到精度分解,晶轴校正范围不小于  $5 \text{ mrad}$ ,校正精度应优于  $10 \mu\text{rad}$ 。

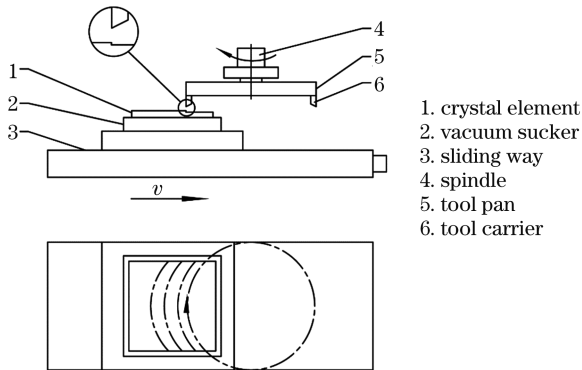


图 2 金刚石切削原理示意图

Fig. 2 Schematic of diamond cutting principle

要达到该调节精度,仅凭调节吸盘角度的精密调节是不够的,原因是:一次调节到位,调节角度达到毫弧度,而精度达到微弧度,两者存在冲突,较难实现;无法考虑元件的装夹情况,从而校正精度受装夹精度和吸附质量影响;无法剔除切削晶体时机床直线度对校正精度的影响,因此对机床直线度要求

高;每次校正前定轴工装都需回零,回零误差影响校正精度;精度会随时间退化,无法实现多件次的校正。综上,仅通过高精度吸盘角度调节方式,难以实现对毫弧度级别晶轴角度的微弧度校正精度,宜采用在位检测反馈和多次调节逼近的方法进行校正,为此提出了在位检测和校正的方法。

2.2 在位检测和校正方法及原理

在位检测和校正过程如图 3 所示。非接触式测头架设于晶体表面上方,激光光束垂直聚焦于晶体表面,晶体随着机床滑台相对于测头匀速移动;测头以固定采样频率扫描采集晶体表面与测头之间的距离,通过该距离信息和机床滑台水平移动距离,计算出晶体表面的倾斜角度,其与晶轴角度误差相减后,结果作为下一次吸盘的调节量;重复以上方法,直到在位检测晶体表面的倾斜角度逐步逼近收敛至晶轴角度误差,金刚石切削晶体表面,完成该面的晶轴角度的校正。

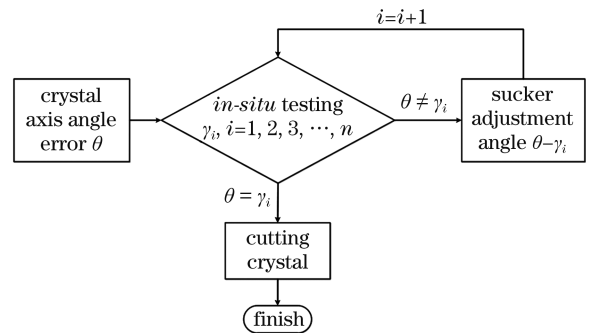


图 3 晶轴角度误差调节程序框图

Fig. 3 Program block diagram of crystal axis angle error adjustment

以上在位检测过程等效于晶体元件固定不动,而测头反方向以滑台移动速度沿着平行于滑台导轨的轨迹检测晶体表面的过程,同理,切削过程也可以等效为刀具反方向以滑台移动速度沿着平行于滑台导轨的轨迹切削晶体表面的过程,即刀具切削轨迹与测头移动轨迹平行,如图 4 所示。

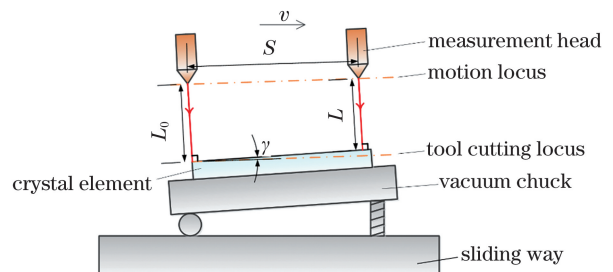


图 4 晶轴角度误差在位检测原理

Fig. 4 Principle of *in-situ* measuring of crystal axis angle error

移动时间与扫描采集时间相同,从图 4 可以得出的表达式为

$$\sin \gamma = (L_0 - L) / S = \Delta L / S, \quad (1)$$

$$S = vt, \quad (2)$$

$$t = c / f, \quad (3)$$

式中: $\gamma$  为在位检测得到的角度,即切削前后的晶体表面形成的夹角,单位为  $\mu\text{rad}$ ;  $L_0$ 、 $L$  分别为测量起始点和测量终点处测得的距离值,单位为  $\mu\text{m}$ ;  $\Delta L$  为测量起始点和测量终点的高度差,单位为  $\mu\text{m}$ ;  $S$ 、 $v$ 、 $t$  分别为移动距离、速度、时间,单位分别为  $\text{m}$ 、 $\text{m/s}$ 、 $\text{s}$ ;  $c$  为采样点数量;  $f$  为采样频率,单位为  $\text{s}^{-1}$ 。

由于在位检测的调节角度为毫弧度量级,因此有  $\gamma = \sin \gamma$ , 即有

$$\gamma = (\Delta L \cdot f) / (v \cdot c). \quad (4)$$

从(4)式可知,晶轴校正角度可以通过非接触式距离测量、采样点数量、采样频率、滑台移动速度 4 个参数计算获得。采样频率和滑台移动速度是开始测量前自行设定的,距离测量和采样点数量是完成测量后通过测量软件截取有效数据后获得的。

由于晶体表面存在微米量级的起伏,测头检测获得的数据也不完全是线性的,使得测量起始点和终点的选取不同,计算结果存在差异,因此仅仅用  $L_0$  和  $L$  测量值计算出的倾斜角度不能够反映晶体表面的真实斜度。为减小测量误差,采用直线拟合的方式获得最接近真实值的斜线,如图 5 所示,通过

求斜率获得调节角度。

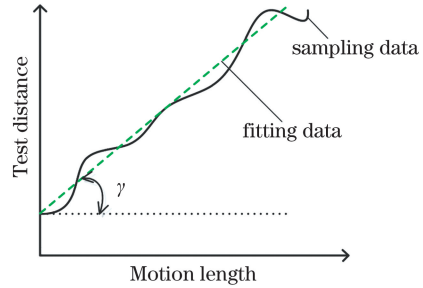


图 5 数据处理

Fig. 5 Data processing

### 3 实验验证

#### 3.1 实验设计

为验证晶轴角度的精密校正方法,选用 3 件大口径 KDP 晶体作为样件进行晶轴角度误差的校正实验,样件信息如表 1 所示。实验前,先在离线的精密定轴检测设备上采用相位匹配方法对晶轴角度误差进行检测,检测结果如表 1 所示,精密定轴检测设备处于  $(20 \pm 0.1)^\circ\text{C}$  恒温环境中,以保证检测精度。晶体加工设备选用立式金刚石机床,其闭环位置反馈的直线电机驱动滑台,定位误差优于  $10 \mu\text{m}$ 。切削刀具用刃口半径为  $5 \text{ mm}$ 、前角为  $-35^\circ$  的天然金刚石刀具。采用 ZYGO 公司制造的 VERY FIRE MST 型大口径干涉仪检测晶体两面楔角,该设备标准镜面形精度达到  $\lambda/10$  ( $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ )。

表 1 样件信息

Table 1 Sample information

Sample	Type	Thickness /mm	Crystal axis angle error / $\mu\text{rad}$
1#	Third harmonic generation crystal	14.4	+3811.5
2#	Third harmonic generation crystal	14.4	+2143.7
3#	Second harmonic generation crystal	14.7	+3878.0

在位检测测量单元选用基恩士公司的 LK-G10 型激光位移传感器,技术指标如表 2 所示,自带测量软件可以设置采样频率,原位定点测量的漂移量不大于  $0.1 \mu\text{m}$ ,如图 6 所示。

表 2 LK-G10 型激光位移传感器的技术指标

Table 2 Technical specification of LK-G10 type laser displacement sensor

Parameter	Value
Measurement range/mm	-1-1
Linearity error / $\mu\text{m}$	0.6
Repeatability precision / $\mu\text{m}$	0.01

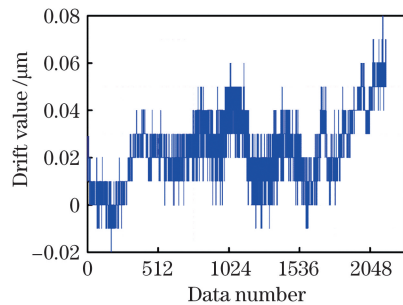


图 6 定点漂移

Fig. 6 In-situ drift

吸盘角度调节工装是专门研制的,采用电动控制且基于实时检测的位置闭环调节方式,可实现

-5~5 mrad 的一维电动调节,大调节量(500~3000 mrad)的平均相对误差精度在 5%以内,小调

节量(1~500 mrad)的误差在 5 mrad 以内,重复回零误差为-16~-5.5 mrad,如图 7 所示。

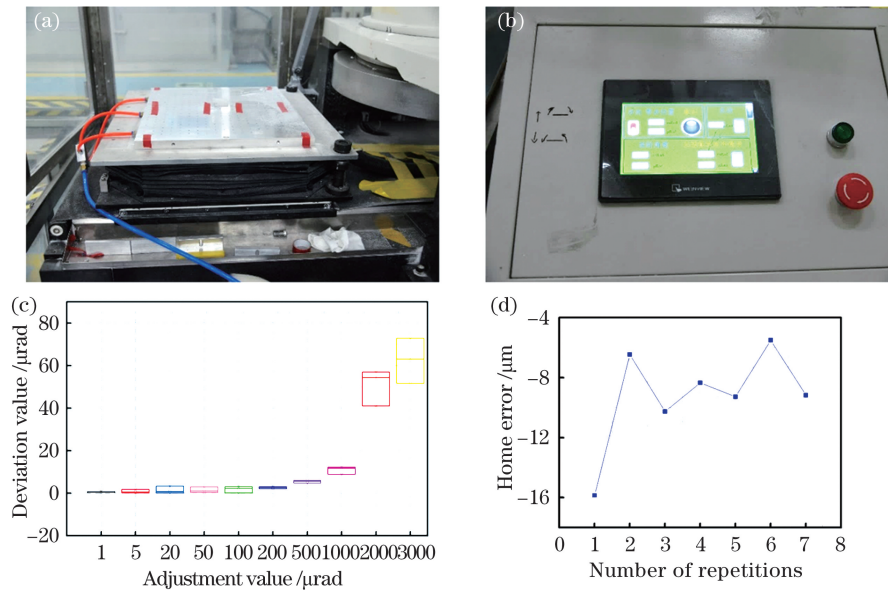


图 7 吸盘角度调节工装。(a)实物照片;(b)操作界面;(c)不同调节量的误差值;(d)回零误差

Fig. 7 Sucker angle adjustment tool. (a) Physical photograph; (b) operating interface; (c) error of different adjustment values; (d) home error

### 3.2 晶轴角度校正过程

基于金刚石切削加工的特点,形成第一面晶轴角度调节、第二面晶轴角度复制的校正流程。具体工艺步骤如表 3 所示。将 KDP 晶体真空吸附装夹于可以调节角度的真空吸盘上,调节吸盘角

度,使晶体 A 面倾斜角度等于晶轴误差角度  $\theta$ ;然后用金刚石飞切方式将晶体 A 面切全,切削后完成 A 面晶轴角度的校正;最后将真空吸盘放平并将 KDP 晶体翻面后再进行切削,将 B 面晶轴角度也校正至  $\alpha - \theta$ 。

表 3 晶轴校正过程

Table 3 Crystal axis correction procedure

Processing step	Prepare	Step 1	Step 2	Step 3	Step 4
Processing content	Clamp crystal to sucker	Adjust sucker to get surface A rotary $\theta$	Cut surface A	Turn-over crystal and flatten sucker	Cut surface B
Schematic diagram					
Crystal axis angle	A: $\alpha$ B: $\alpha$	A: $\alpha$ B: $\alpha$	A: $\alpha - \theta$ B: $\alpha$	A: $\alpha - \theta$ B: $\alpha$	A: $\alpha - \theta$ B: $\alpha - \theta$

第一步,调节吸盘,本步骤是在位检测并反复迭代调节的过程,检测时设置采样频率为 250 Hz 或 100 Hz,滑台速度为 400~700 mm/min,经过多次调节逐步逼近晶轴误差角度。3 件样件在迭代过程中的相关参数如表 4 所示,可以看出,通过三轮次的迭代便可完成吸盘角度调节。图 8 是 1# 晶体校正前后

的数据,读取数据、检测数据后,输入滑台速度、采样频率,通过数据拟合便可获得测试角度。上图是完整的原始数据,其中横坐标为采样点数,纵坐标为晶体表面高度;下图中横坐标转换为测试长度,曲线是原始数据经截取左右无效数据的数据,斜线是一次拟合线,斜线与横轴的夹角便是在位检测的角度。



表 4 3 件样件在迭代过程中的相关参数

Table 4 Relevant parameters of three sample pieces during the iteration

unit:  $\mu\text{rad}$

Iteration turn	1#		2#		3#	
	Adjustment value	Deviation value	Adjustment value	Deviation value	Adjustment value	Deviation value
1	-3871.46	-59.96	-2172.57	-28.87	-3887.94	-9.94
2	-3805.77	5.73	-2143.81	-0.11	-3884.91	-6.91
3	-3811.58	-0.08	-2143.63	0.07	-3878.04	-0.04

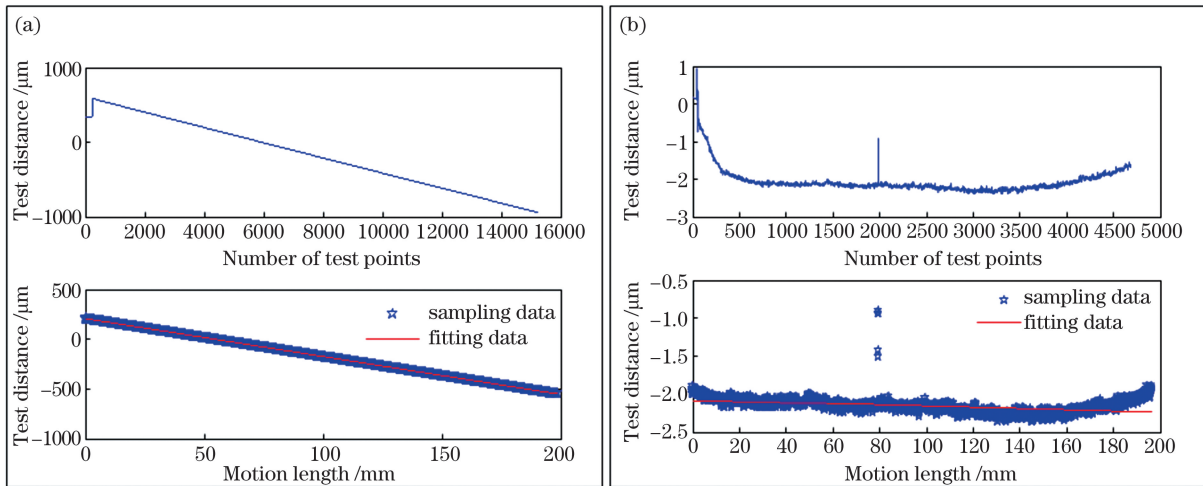


图 8 1# 样件在位检测晶体表面结果。(a) 切削前; (b) 切削后

Fig. 8 *In-situ* testing results of crystal surface of sample 1#. (a) Before cutting; (b) after cutting

第二步, 切削晶体参数选用慢速进给、小切深, 以保证切削斜面过程中不发生崩边, 切削完成后, 在位检测 1#、2#、3# 晶体表面角度分别为  $-0.12 \mu\text{rad}$ 、 $+0.76 \mu\text{rad}$ 、 $+0.82 \mu\text{rad}$ , 即切削后角度保持为  $-1 \sim 1 \mu\text{rad}$ , 如图 8(b) 所示, 说明切削前在位检测和调节的角度基本上等于切削后

晶体表面角度变化量。第二个面的晶轴校正工作直接通过翻面复制切削完成, 切削完成后用大口径干涉仪检测晶体两面形成的楔角。图 9 为 1# 晶体的检测结果, 其两面夹角为  $0.2''$  ( $0.93 \mu\text{rad}$ ), 说明经过复制切削后两面晶轴角度基本保持一致。

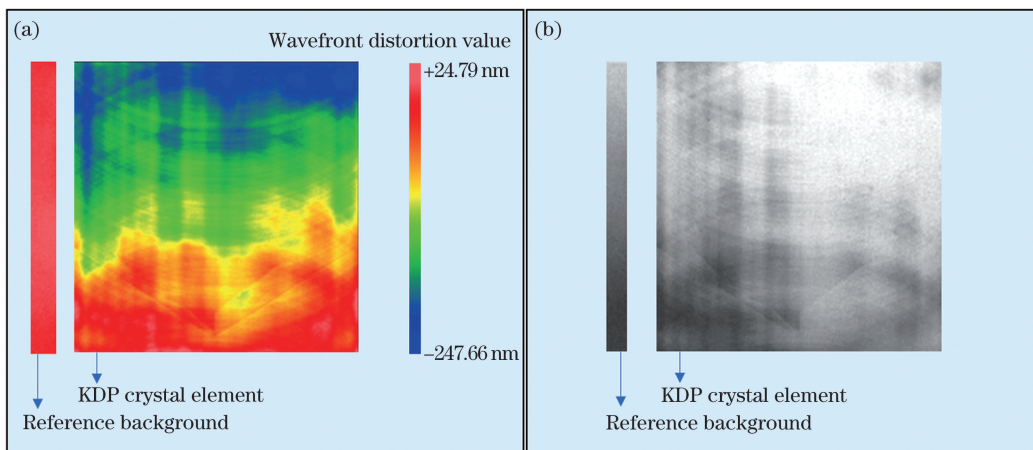


图 9 1# 样件校正后两面夹角

Fig. 9 Angle between two surfaces of sample 1# after correction

### 3.3 校正结果和精度分析

完成 3 件晶体晶轴角度的校正后, 由离线的精

密定轴检测设备再次检测晶体第一面的晶轴角度误差, 结果表明, 经精密定轴检测设备检测后, 3 件晶

轴角度误差分别为  $+11.4 \mu\text{rad}$ 、 $-9.0 \mu\text{rad}$ 、 $0.59 \mu\text{rad}$ 。1# 样件检测结果如图 10 所示,其中小方块代表精密定轴检测设备(CATS)检测出的数据,小圆代表正交偏振干涉仪(OPI)检测出的数据。说明采用本校正方法,借助高精度角度调节工装,仅 3 轮次的迭代调节便可将晶轴角度误差从数个毫弧度快速收敛至  $20 \mu\text{rad}$  以内。

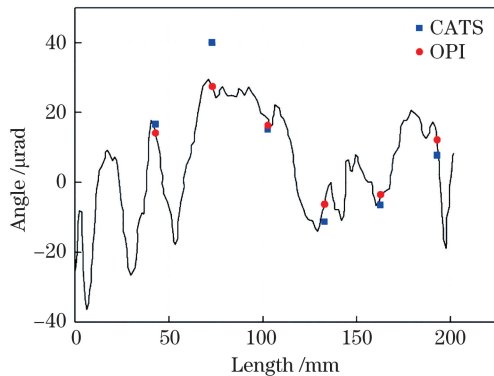


图 10 1# 样件检测结果

Fig. 10 Test result of sample 1#

从校正原理和(1)式可以看出,校正角度与吸盘角度调节工装的调节精度、回零误差、装夹误差、机床直线度无关,仅取决于在位测量单元的精度和测试距离。进一步由(1)式可得到

$$u(\gamma) = \sqrt{[u(\Delta L)/S]^2 + [\Delta L \cdot u(S)/S^2]^2}, \quad (5)$$

校正精度由测量单元的不确定度和测试距离的不确定度构成。由于测试距离  $S$  为百毫米级,而测试距离不确定度  $u(S)$  和相对高度  $\Delta L$  均是微米级,因此(5)式中等号右边第二项可以忽略,进而得到

$$u(\gamma) = u(\Delta L)/S, \quad (6)$$

式中: $u(\gamma)$ 、 $u(\Delta L)$ 、 $u(S)$  分别为校正角度、测量单元、移动距离的不确定度。

由(6)式可知,校正精度与测量单元的精度呈正相关,而与移动距离呈负相关,因此元件口径越大,校正精度越高。表 2 列出在位测量单元的线性度误差为  $0.6 \mu\text{m}$ ,定点漂移误差为  $0.1 \mu\text{m}$ ,则在位测量单元引入的测量不确定度  $u(\gamma)$  为  $0.7 \mu\text{m}$ ,将其代入(6)式,可得图 11 所示的元件口径与校正精度的关系曲线,结果说明,所提方法更适用于大口径晶体元件的校正。值得注意的是,虽然校正误差不受吸盘角度调节工装调节精度的影响,但校正效率却受其影响较大,调节精度越高,则迭代次数越少,调节效率越快。

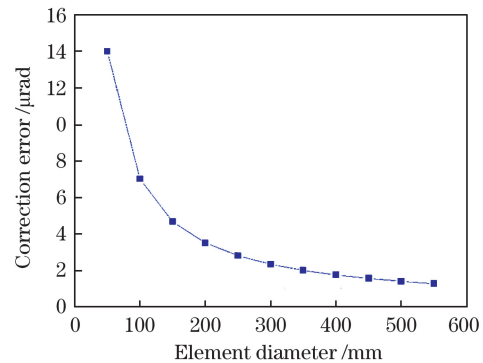


图 11 校正误差与元件口径的关系

Fig. 11 Relationship between calibration error and element aperture

## 4 结 论

通过在位检测反馈和多次调节逐步逼近的收敛策略,结合高精度角度调节工装,解决了 KDP 晶体晶轴角度误差校正角度大、精度高的问题,实现了晶轴角度的快速高精度校正。晶轴角度误差校正的验证实验结果表明:通过该校正方法,经过 3 轮迭代调整能够快速将数个毫弧度的晶轴误差收敛至  $20 \mu\text{m}$  以内,满足精密定轴的指标和效率要求。校正精度分析结果表明:校正精度与测试精度呈正比,与测头移动长度呈反比,随着元件口径增大,校正精度显著提高,因此所提方法适用于大口径晶体的精密校正;校正精度虽然与吸盘调节工装无关,但校正效率与吸盘调节工装调节精度呈正相关,调节精度越高,迭代次数越少,校正效率越高。所提方法可为加工阶段大口径 KDP 晶体晶轴的精密定轴提供理论依据,为工程实践提供理论指导。

## 参 考 文 献

- [1] Shao J D, Zhu M P, Li J P, et al. Research progress on large size polarizer coating for inertial confinement fusion laser application[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(10): 1000001.  
邵建达, 朱美萍, 李静平, 等. 惯性约束聚变激光驱动装置用大尺寸偏振薄膜研究综述[J]. 光学学报, 2019, 39(10): 1000001.
- [2] Zhang Y, Li T, Yuan X D, et al. Theoretical model of phase-matching angles for KDP crystals and its verification analysis[J]. Acta Physica Sinica, 2015, 64(2): 024213.  
张洋, 李婷, 袁晓东, 等. KDP 晶体相位匹配角理论预测模型及其验证分析[J]. 物理学报, 2015, 64(2): 024213.
- [3] Wu J M, Zhao Y A, Wang L, et al. Coupling

- conditioning effect of DKDP crystals under simultaneous irradiation by 1064 nm laser and 355 nm laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(5): 0501003.
- 吴金明, 赵元安, 汪琳, 等. 1064 nm 激光和 355 nm 激光同时辐照 DKDP 晶体的耦合预处理效应[J]. 中国激光, 2019, 46(5): 0501003.
- [4] Sun Z M, Liu D A, Han L, et al. Study on gain bandwidth characteristics of DKDP-OPCPA based on electro-optic modulation [J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(10): 1008001.
- 孙子茗, 刘德安, 韩璐, 等. 基于电光调制的 DKDP 晶体 OPCPA 增益带宽特性研究[J]. 中国激光, 2020, 47(10): 1008001.
- [5] Guo H W, Zhou W, Ye L, et al. Effect of crystals' surface shape distortion on conversion efficiency of third harmonic generation[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2020, 32(6): 061002.
- 郭怀文, 周维, 叶朗, 等. 晶体面形畸变对三倍频转换效率的影响[J]. 强激光与粒子束, 2020, 32(6): 061002.
- [6] Li T, Zhang Y, Xu X, et al. Prediction of optimum deflection angles and errors analysis for KDP crystals with large aperture [J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(8): 0802003.
- 李婷, 张洋, 徐旭, 等. 大口径 KDP 晶体最佳偏转角预测误差分析[J]. 中国激光, 2014, 41(8): 0802003.
- [7] Cai B W, Mi G J, Yang C L. Study of orientation way for large aperture KDP crystal [J]. Laser Technology, 1999, 23(1): 3-5.
- 蔡邦维, 秘国江, 杨春林. 大口径 KDP 晶体定向方法的研究[J]. 激光技术, 1999, 23(1): 3-5.
- [8] Hawley-Fedder R A, Geraghty P, Locke S N, et al. NIF pockels cell and frequency conversion crystals [J]. Proceedings of SPIE, 2004, 5341: 121.
- [9] Runkel M, McBurney M. Metrology aims for precision[EB/OL]. [2020-10-17]. <https://spie.org/news/metrology-aims-for-precision?SSO=1>.
- [10] Taylor J S, Carlisle K, Klingmann J L, et al. Precision engineering within the national ignition campaign [C] // 10th International Conference of the European Society for Precision Engineering & Nanotechnology, May 31-June 4, 2010, Delft, Netherlands. [S. l.: s. n.], 2010.
- [11] Pei G Q, Du W F, Ye L, et al. A precision crystal phase-matching angle metrology instrument [J]. Optics & Laser Technology, 2019, 114: 110-113.
- [12] Wang W, Li K Y, Wang J, et al. Analysis on dependence of phase matching angle on temperature in KDP crystal [J]. Optics & Laser Technology, 2011, 43(3): 683-686.
- [13] Xu X, Xiong Z, Ye L, et al. Measurement precision for phase-matching angle of large-aperture KDP crystals[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2013, 25(12): 3189-3192.
- 徐旭, 熊召, 叶朗, 等. 大口径 KDP 晶体角度相位匹配离线测量精度研究[J]. 强激光与粒子束, 2013, 25(12): 3189-3192.
- [14] Zhang Y, Xiong Z, Xu X, et al. Influence of structure parameters for two sides support on third harmonic conversion efficiency[J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(6): 0602008.
- 张洋, 熊召, 徐旭, 等. 两端支撑夹持结构参数对三倍频转换效率的影响[J]. 中国激光, 2014, 41(6): 0602008.

## Precise Correction for Crystal Axis Angle of KDP Crystal Element

Zhang Shuai, Jin Bojia\*, Wang Xiangfeng, Lei Xiangyang, Wang Jian, Xu Qiao

Research Center of Laser Fusion, China Academy Engineering Physics, Chengdu, Sichuan 610000, China

### Abstract

**Objective** Potassium Dihydrogen Phosphate ( $\text{KH}_2\text{PO}_4$ ) (KDP) crystal is currently the only nonlinear optical material that can be grown into a large aperture. It is widely used in inertial confinement fusion large aperture laser drivers as the terminal element of the harmonic conversion unit. The angle phase matching method is generally used to obtain high harmonic conversion efficiency so that the KDP crystal axis angle (the angle between the crystal plane normal and the crystal optical axis) is equal to the phase matching angle. From the growth to use, KDP crystals have gone through the following stages: slicing, processing, chemical coating, assembly, and adjustment. The crystal axis angle orientation accuracy is poorly controlled in the slicing stage, resulting in the crystal axis error of the milliradian. If the crystal axis error is encountered in the adjustment stage, it takes a considerable amount of time to adjust the crystal pose to achieve the best phase matching condition. This will increase the difficulty in assembly and

reduce the efficiency of assembly and adjustment. It is also not conducive for batch assembly and large-scale production. Therefore, large-aperture laser devices require high-precision crystal axis angle correction during the processing stage.

**Methods** To solve the problems of a large correction angle and high precision requirements in the angle error correction of the crystal axis of the KDP crystal in the processing stage, a correction strategy of an *in-situ* detection feedback combined with multiple adjustment approximations is proposed. The crystal element is clamped on an adjustable angle vacuum chuck, and the noncontact distance measuring unit is erected above the crystal surface. With the movement of the machine tool slide, the measuring unit moves at a uniform speed relative to the crystal. The distance between the crystal surface and the probe is recorded at a fixed sampling frequency. Combining this distance and the movement distance of the machine tool sliding table, the crystal surface inclination angle can be obtained by the straight-line fitting. This angle is subtracted from the crystal axis angle error detected offline as the suction cup's adjustment value. After adjusting the suction cup, the proposed method is employed to detect the crystal surface tilt angle again. The above steps are repeated until the tilt angle of the *on-site* inspection crystal surface gradually approaches and converges toward the crystal axis angle error. Cutting the crystal surface with a diamond tool can complete the correction of the surface crystal axis angle. The crystal axis angle on the other side is corrected by turning over and cutting. The advantage of this method is that the correction accuracy does not depend on advanced adjustment tools, small reclamping errors, and precise linear axes.

**Results and Discussions** The crystal axis correction on the first side of the KDP crystal is a process of an *in situ* detection and repeated iterative adjustments. The relevant parameters of three crystal samples during the iteration (Table 4) show that they gradually approached the crystal axis error angle after three rounds of adjustments. After the cutting is completed by the machine tool, the *in situ* detection result of 1#, 2#, and 3# crystal surface angles are  $-0.12 \mu\text{rad}$ ,  $+0.76 \mu\text{rad}$ , and  $+0.82 \mu\text{rad}$ , respectively. In other words, the surface angle after cutting is controlled within  $1 \mu\text{rad}$  [Fig. 8(b)]. The results show that the angle of *in situ* detection before cutting is equal to the change in the crystal surface angle before and after cutting. After cutting the other side of the KDP crystal, use a large-diameter interferometer to detect the crystal wedge angle. The angle of both sides is  $0.2''$  ( $0.93 \mu\text{rad}$ ) (Fig. 9), indicating that the crystal axis angles on both sides are the same after the second surface is cut. After completing the crystal axis angle correction of the three samples, the off-line precision crystal axis inspection equipment is used to detect the crystal axis angle error of the crystal. The results showed that the angle errors of the three crystal axes are  $+11.4 \mu\text{rad}$ ,  $-9.0 \mu\text{rad}$ , and  $0.59 \mu\text{rad}$ , respectively (Fig. 10 and Table 5).

**Conclusions** The proposed crystal axis error correction strategy of KDP crystal in the processing stage is based on the *on-site* detection feedback and multiple adjustment convergence. The correction requirements of the milliradian angle and microradian accuracy can be achieved using the proposed method. Results suggest that the proposed method can meet large-scale laser devices' requirements for KDP crystal axis use. The verification experiment results showed that only three rounds of iterative adjustment, the proposed method can quickly converge the angle error of the crystal axis from several millimeters to  $20 \mu\text{rad}$  or less. Further analysis shows that the correction accuracy of the strategy is only determined by the length of the probe movement and the test accuracy. The larger the element diameter and higher the measurement accuracy, the higher the correction accuracy, which is particularly suitable for the crystal axis angle correction of the large-diameter KDP crystal element. Although the correction accuracy is unrelated with the suction cup adjustment accuracy, the correction efficiency is proportional to it. The higher the adjustment accuracy, the fewer the number of iterations and the higher the correction efficiency.

**Key words** optical devices; KDP crystal element; crystal axis angle; diamond cutting; *in-situ* testing; phase matching

**OCIS codes** 230.4320; 120.4610; 220.4610; 350.3850