

## 薄片 DKDP 晶体前后表面损伤识别技术研究

万 能<sup>1,2</sup>, 达争尚<sup>1</sup>, 李红光<sup>1</sup>, 袁索超<sup>1</sup>

- (1. 中国科学院西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710119;
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘 要:** 在全内反射边缘照明的基础上, 利用 DKDP 晶体的双折射特性, 解决了区分 DKDP 晶体自身前后表面损伤的问题。紫外光入射到 11 mm 厚的 DKDP 晶体会分解为 *o* 光和 *e* 光, 并在出射面产生 254.738  $\mu\text{m}$  (理论值) 的偏离量。这个偏离量导致 DKDP 晶体后表面损伤在 CCD 上成双像(一个是 *o* 光成像, 另一个是 *e* 光成像), 可以用偏振片对双像进行调制; DKDP 晶体前表面损伤在 CCD 上只有单像, 不受偏振调制影响。通过偏振调制, 可以避免重复提取同一个损伤信息, 提高损伤识别精度。实验证明: 该方法可以区分厚度为 11 mm 的 DKDP 晶体前后表面损伤。

**关键词:** DKDP 晶体; 双折射; 偏振; 损伤检测; 前后表面

中图分类号: TN247 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201746.0817001

## Identification of the front or rear surface damage of the thin DKDP crystal

Wan Neng<sup>1,2</sup>, Da Zhengshang<sup>1</sup>, Li Hongguang<sup>1</sup>, Yuan Suochao<sup>1</sup>

- (1. Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** On the basis of total internal reflection edge illumination, a method can be used to identify the damage on front or rear surface of the thin DKDP crystal by the birefringence of DKDP crystal. When an ultraviolet ray incidented upon a DKDP crystal whose thickness was 11 mm, a displacement of 254.738  $\mu\text{m}$  (theoretical value) between *o*-ray and *e*-ray on the exit surface will be caused due to the birefringence of DKDP crystal. The damage located on the rear surface of DKDP had double-images, which could be modulated by polarizer placed in front of CCD camera. The damage located on the front surface of DKDP had a single-image, which couldn't be modulated by polarizer. The method had the ability of avoiding extracting the information of a damage repeatedly, and improving the accuracy of damage identification. The experiments demonstrate that the method can distinguish the damage on front or rear surface of the thin DKDP crystal whose thickness is 11 mm.

**Key words:** DKDP crystal; birefringence; polarization; damage inspection; front or rear surface

收稿日期: 2016-12-05; 修订日期: 2017-01-15

作者简介: 万能(1992-), 男, 硕士生, 主要从事 DKDP 晶体损伤检测方面的研究。Email: wanneng@opt.cn

导师简介: 达争尚(1973-), 男, 研究员, 博士生导师, 博士, 主要从事强激光参数诊断及控制方面的研究。

Email: dazhengshang@opt.ac.cn

## 0 引言

在高功率固体激光装置中,强激光在光学元件中的传输伴随显著的非线性效应,巨大的能量和非线性效应会造成光学元件损伤<sup>[1-2]</sup>。KDP/DKDP 晶体作为激光频率转换器件,在多波长激光作用下,极易产生损伤<sup>[3]</sup>。DKDP 是 KDP 的同位素化合物,与 KDP 晶体类似,在多波长激光作用下,也容易产生损伤<sup>[4-5]</sup>。因此,需要采用在线检测技术对 DKDP 晶体的损伤情况进行实时监控,在元件损坏之前修复或换下,保障高功率固体激光器安全运行<sup>[6]</sup>。在线检测技术不仅需要提高损伤识别精度,而且要能够区分 DKDP 晶体前后表面的损伤。利用全内反射边缘照明技术,解决了损伤检测过程中判断疵点到底归属于光学系统中哪块光学元件的难题<sup>[7-9]</sup>。由于 DKDP 晶体太薄,目前光学元件在线检测技术尚不能快速有效区分 DKDP 晶体前后表面损伤。DKDP 晶体厚 11 mm,为实现 5 mm 的纵向分辨率,要求物镜的景深不大于 5 mm。那么不仅需要大靶面、高像素数的 CCD,还需要入瞳口径大的物镜(即物镜系统的  $F$  数小)。对于相同  $F$  数的物镜,入瞳口径越大,物镜的焦距就越长。因此,物镜的体积和重量都会相应增大。由于在线检测的环境空间局限性,难以通过光学系统直接分辨的方式完成对 11 mm 后晶体的前后表面损伤识别。目前通常采用的方法是根据元件前后表面损伤成长特征不同,通过观察损伤点的动态演化过程来判断损伤点前后表面归属<sup>[10-11]</sup>。

DKDP 晶体是各向异性的,具有双折射性质,光线沿着非光轴方向入射进 DKDP 晶体,会分解为  $o$  光和  $e$  光。 $o$  光和  $e$  光都是线偏振光,振动方向互相垂直、传播速度不同、折射率不等。利用 DKDP 的双折射特性,加入偏振调制,对比 CCD 前加偏振片的照片和不加偏振片的照片就能区分 DKDP 晶体前后表面损伤。

## 1 DKDP 晶体双折射特性分析

DKDP 晶体是负单轴晶体, $n_o > n_e$ , $n_o$  是  $o$  光折射率, $n_e$  是  $e$  光折射率<sup>[12]</sup>。DKDP 的晶体切割角度  $\theta$  为  $60.1^\circ$ (光轴与晶体入射面法线方向的夹角)。由于 DKDP 晶体的双折射效应,光束在晶体中传播时, $o$  光

的波矢方向与光线传播方向一致,而  $e$  光的波矢方向与光线传播方向不一致,存在一定的偏离角  $\alpha$ 。上述现象导致损伤点出射的光线在晶体中传播时, $o$  光和  $e$  光的光线方向逐渐分离,最终在晶体出射面产生偏移  $\delta$ 。DKDP 双折射示意图如图 1 所示,从前表面观察后表面的损伤点,可以观察到两个虚像。图 1 中, $\alpha=60.1^\circ$ ,为 DKDP 晶体切割角,即光轴与水平方向的夹角。 $\gamma$  为  $o$  光与 DKDP 晶体光轴的夹角,对于水平方向的  $o$  光:

$$\gamma = \alpha = 60.1^\circ \quad (1)$$

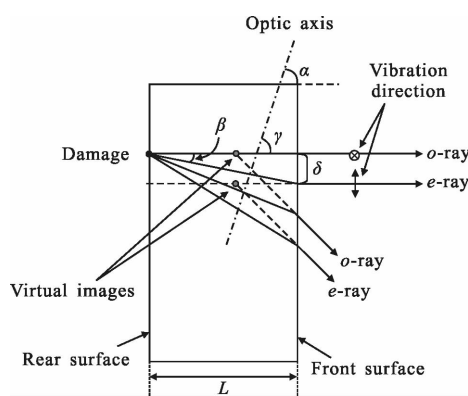


图 1 DKDP 晶体双折射示意图

Fig.1 Diagram of DKDP's birefringence

由 DKDP 的色散方程可以求出  $n_o$ 、 $n_e$  的大小<sup>[13]</sup>( $\lambda$  为  $0.395 \mu\text{m}$ ):

$$n_o^2 = 2.240921 + \frac{2.246956\lambda^2}{\lambda^2 - (11.26591)^2} + \frac{0.009676}{\lambda^2 - (0.124981)^2} = 2.307 \quad (2)$$

$$n_e^2 = 2.126019 + \frac{0.784404\lambda^2}{\lambda^2 - (11.10871)^2} + \frac{0.008578}{\lambda^2 - (0.109505)^2} = 2.185 \quad (3)$$

式中: $e$  光与  $o$  光的夹角  $\beta$  由下述公式可求出:

$$\tan\beta = \frac{(n_e^2 - n_o^2)\tan\gamma}{n_e^2 + n_o^2 \tan^2\gamma} = -0.02325 \quad (4)$$

取绝对值:

$$\tan\beta = 0.02325 \quad (5)$$

$e$  光经过晶体产生的偏移量:

$$\delta = L \tan\beta \quad (6)$$

式中: $L$  为 DKDP 晶体厚度。

此次实验中,照明光波长为  $395 \text{ nm}$ ,DKDP 晶体

厚 11 mm, 计算得到偏移  $\delta=254.738 \mu\text{m}$ 。这个偏移量相对于损伤尺寸(百微米量级)来说足够大, 可以被 CCD 观察到。

利用此次实验仪器的参数, 推导成像系统能分辨双像的 DKDP 晶体的最小厚度。

CCD 的像素尺寸为  $4.65 \mu\text{m} \times 4.65 \mu\text{m}$ , 若要在 CCD 上区分两个点, 需要相隔两个像素, 距离为  $9.3 \mu\text{m}$ 。在 DKDP 晶体上, 两点的实际距离为  $(-0.084$  是物镜放大率):

$$\delta_{\min} = \left| \frac{9.3}{-0.084} \right| = 110.714 \mu\text{m} \quad (7)$$

根据公式(6)有:

$$L_{\min} = \frac{\delta_{\min}}{\tan\beta} = 4.76 \text{ mm} \quad (8)$$

根据公式(8), 理论上厚度大于 4.76 mm 的 DKDP 晶体可以利用此次实验仪器区分前后表面损伤。

## 2 检测原理及实验方案

采用全内反射独立分时边缘照明, 照明光波长为 395 nm。光线在 DKDP 晶体中发生全反射, 损伤点会破坏全反射, 将光线散射出来, 散射光经成像系统可在 CCD 成像<sup>[14]</sup>, 检测光路如图 2 所示。

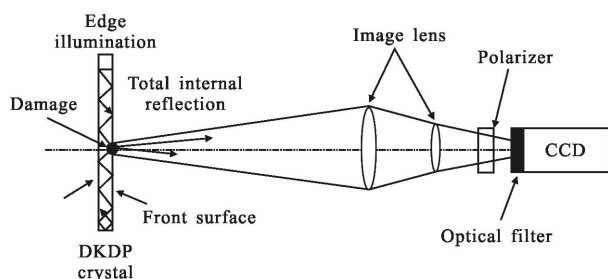


图 2 检测光路示意图

Fig.2 Diagram of detection optical path

由 DKDP 晶体双折射特性分析中的推导可知, 后表面损伤点散射出的光线, 经过 DKDP 晶体会分解为  $o$  光和  $e$  光,  $o$  光和  $e$  光经过成像系统都能在 CCD 上成像。 $o$  光和  $e$  光都是线偏振光, 并且振动方向垂直, 在 CCD 前调节偏振片可以对双像进行调制。前表面损伤点散射出的光线并不分解为  $o$  光和  $e$  光, 没有偏振效应, 在 CCD 上只成一个像。

根据马吕斯定律: 强度为  $I_0$  的线偏振光, 透过偏振片后, 透射光的强度(不考虑吸收)为:

$$I = I_0 \cos^2\theta \quad (9)$$

式中:  $\theta$  为光的振动方向与偏振片的偏振方向的夹角, 转动偏振片,  $\theta$  发生变化。

针对  $o$  光和  $e$  光是相互垂直的线偏振光, 有如下三个现象:

(1) 在未加入偏振片的情况下, 后表面损伤在 CCD 上成双像, 前表面损伤在 CCD 上只有单像;

(2) 在 CCD 前加入偏振片, 由  $0^\circ \sim 180^\circ$  转动偏振片, 后表面损伤的双像会交替由亮变暗, 然后由暗变亮;

(3) 在 CCD 前加入偏振片后, 转动偏振片, 前表面损伤的单像的亮度不会变化。

根据以上三个现象可以准确判断损伤属于 DKDP 晶体哪个表面。

## 3 实验结果及分析

实验装置如图 3 所示。

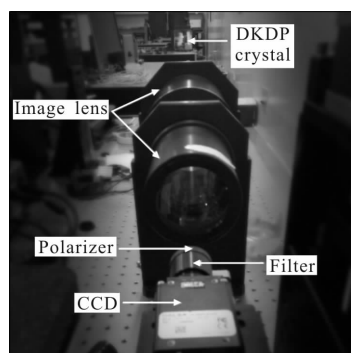


图 3 实验装置图

Fig.3 Experimental installation

此次实验中, CCD 参数为: 像素尺寸为  $4.65 \mu\text{m} \times 4.65 \mu\text{m}$ , 像素数量为  $1392 \times 1040$ 。成像系统的放大倍率为  $-0.084$ , DKDP 晶体厚度为 11 mm。照明光波长为 395 nm。

当损伤点在后表面, 不加偏振片时, 得到如图 4(a)~(b)所示的图像。从图 4(a)中可观察到两对双像图样, 双像之间距离相等, 形状一样。在图 4(a)中, 根据双像对应点的像素坐标可以计算出照片中双像之间的距离。经过图像处理, 选取两对对应像素点, 它们间隔 5 个像素, 每个像素尺寸为  $4.65 \mu\text{m}$ , 在照片中两相似图像距离为  $23.25 \mu\text{m}$ 。根据物镜放大率为  $-0.084$ , 可计算出双像实际距离为  $276.79 \mu\text{m}$ , 接近理论计算的  $254.788 \mu\text{m}$ , 误差为 8.66%。图 4(b)中没

有出现双像。符合双折射的推理,验证了现象(1)。

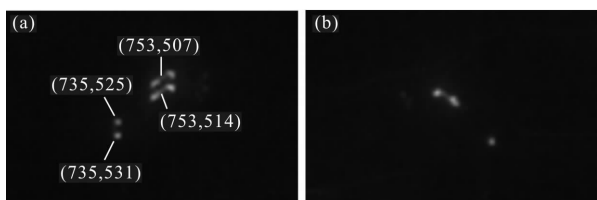


图 4 未加偏振片时图像,损伤在 DKDP 后表面时得到图(a),根据对应像素的坐标可以计算双像之间的距离;损伤在 DKDP 前表面时得到图(b)

Fig.4 Images without polarizer (a) was obtained when the damage was on the rear surface of DKDP, and the displacement between the two similar images could be calculated by the coordinates of two corresponding pixels in the image (b) was obtained when the damage was on the front surface of DKDP

选定图 4 中的损伤区域,在 CCD 前加入偏振片,转动偏振片,得到如图 5(a)~(i)所示的双像变化图像。它们是交替变暗的,符合现象(2)。当偏振片偏振方向旋转至竖直方向时,得到图 5(a)和(i);当偏振片偏振方向旋转至水平方向时,得到图 5(e)。

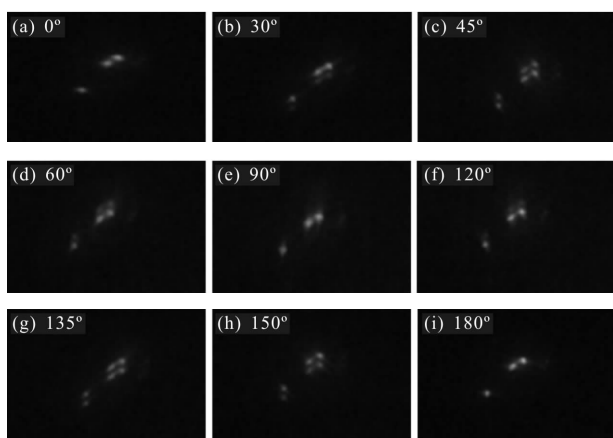


图 5 转动偏振片,双像变化图像

Fig.5 Changes of the double-images by rotating polarizer

将 DKDP 晶体绕竖直方向旋转 180°,转动偏振片,观察同一个损伤点成像情况,得到如图 6(a)~(i)所示的图像。从图 6(a)~(i)的图像可知,将 DKDP 晶体绕竖直方向旋转 180°后,图 5 中的损伤点在 CCD 上只有一个像。在 CCD 前转动偏振片,损伤点的像不发生明显的明暗变化(经此损伤点散射的光线没有偏振效应)。符合现象(3)。

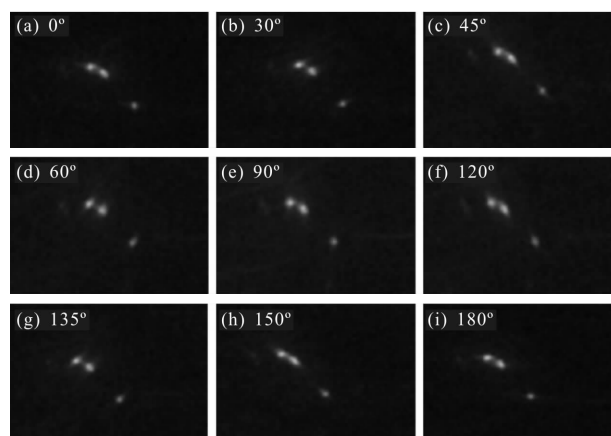


图 6 转动偏振片损伤图像变化

Fig.6 Changes of damages images by rotating polarizer

## 4 结 论

采用全内反射边缘照明,基于 DKDP 晶体的双折射特性,通过对晶体分解后的 *o* 光和 *e* 光进行偏振调制来区分晶体的前后表面损伤。理论上 DKDP 晶体的最小厚度为 4.76mm,此次实验证明了对 11mm 厚的 DKDP 晶体有效,根据公式(6)可知,DKDP 晶体越厚(*L* 越大),双像距离越大,越容易分辨。

在不使用偏振调制的情况下,难以区分重复的像,加入偏振调制后,可以有效剔除重复的像,提高识别精度。通过对损伤图像的直接识别代替对处理后图像的间接识别,大大减少了图像处理的工作量。

## 参 考 文 献:

- [1] Stuart B C, Feit M D, Rubenchik A M, et al. Laser-induced damage in dielectrics with nanosecond to subpicosecond Pulses [J]. *Phys Rev Lett*, 1995, 74(12): 2248-2251.
- [2] Stéphane Reyné, Guillaume Duchateau, Jean Yves Natoli, et al. Laser-induced damage of KDP crystals by 1ω nanosecond pulses: influence of crystal orientation [J]. *Optics Express*, 2009, 17(24):21652-21665.
- [3] Stéphane Reyné, Guillaume Duchateau, Jean Yves Natoli, et al. 355 nm and 1 064 nm-pulse mixing to identify the laser-induced damage mechanisms in KDP [C]//SPIE, 2011, 7937: 79370L.
- [4] Carr C W, Radousky H B, Demos S G. Wavelength dependence of laser-induced damage: determining the damage initiation mechanisms [J]. *Phys Rev Lett*, 2003, 91 (12): 127402.

- [5] Alan K Burnham, Michael Runkel, Michael D Feit, et al. Laser-induced damage in deuterated potassium dihydrogen phosphate [J]. *Applied Optics*, 2003, 42(27): 5483–5495.
- [6] Thompson C E, Knopp C F, Decker D E. Optics damage inspection for the NIF [C]//SPIE, 1999, 3492: 921–932.
- [7] Peng Zhitao, Wei Xiaofeng, Yuan Haoyu, et al. Signal noise ratio of total internal reflection edge illumination for optics damage inspection [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(6): 1111–1114. (in Chinese)  
彭志涛, 魏晓峰, 元浩宇, 等. 全内反射照明光学元件损伤检测信噪比分析[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(6): 1111–1114.
- [8] Shi Lin, Li Dahai, Li Fuming, et al. Research of optics damage inspection from its dark-field method [J]. *Laser Journal*, 2008, 29(6): 29–30. (in Chinese)  
时霖, 李大海, 李付明, 等. 光学元件损伤的暗场检测方法研究[J]. 激光杂志, 2008, 29(6): 29–30.
- [9] Feng Bo, Chen Fengdong, Liu Bingguo, et al. RANSAC–SVM based online inspection technique for optics damage in internal confinement fusion system [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, 40(8): 0808002. (in Chinese)  
冯博, 陈凤东, 刘炳国, 等. 基于 RANSAC–LSSVM 回归的惯性约束聚变光学元件损伤在线检测技术 [J]. 中国激光, 2013, 40(8): 0808002.
- [10] Qiu Rong, Wang Junbo, Li Xiaohong, et al. Laser-induced damage on K9 surface under nanosecond irradiation [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2011, 23(8): 2101–2105. (in Chinese)  
邱荣, 王俊波, 李晓红, 等. 纳秒强激光诱导 K9 玻璃表面损伤实验[J]. 强激光与粒子束, 2011, 23(8): 2101–2105.
- [11] Gao Zhishan, Chen Jinbang. Enter into the measurement of laser-induced damage optical surface [J]. *Laser Technology*, 2000, 24(3): 185–189. (in Chinese)  
高志山, 陈进榜. 激光损伤光学表面的检测研讨 [J]. 激光技术, 2000, 24(3): 185–189.
- [12] Zhu Shengjun, Wang Shenglai, Liu Lin, et al. Refractive index homogeneity of large scale potassium dihydrogen phosphate crystal [J]. *Acta Phys Sin*, 2014, 63(10): 107701. (in Chinese)  
朱胜军, 王圣来, 刘琳, 等. 大尺寸磷酸二氢钾晶体的折射率均一性研究[J]. 物理学报, 2014, 63(10): 107701.
- [13] Dmitriev V G, Gurzadyan G G, Nikogosyan D N. Handbook of Nonlinear Optical Crystals [Z]. Bert lin: Springer–vertag, 1997.
- [14] Alan Conder, Terry Alger, Stephen Azeredo, et al. Final Optics Damage inspection (FODI) for the national ignition facility[C]//SPIE, 2007, 6720: 672010.