

文章编号 1004-924X(2017)08-1987-08

激光预处理提升 DKDP 晶体加工表面的抗损伤能力

罗 阳^{1,2}, 胡国行^{1*}, 赵元安^{1*}, 杨留江¹, 曹 珍^{1,2}, 李大伟¹, 刘晓凤¹

(1. 中国科学院 上海光学精密机械研究所 中国科学院强激光材料重点实验室, 上海 201800;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:针对晶体表面的损伤特性,采用小光斑扫描激光预处理技术预辐照 DKDP 晶体元件,并采用表面损伤自动探测系统实时分析每个脉冲辐照后晶体表面的损伤情况,比较预处理和未预处理区域的损伤点密度确定表面预处理效果,并进一步模拟分析表面各类缺陷在纳秒强激光辐照下的动态过程,解释激光预处理对精抛表面提升作用的微观机制并分析它对粗抛表面提升不明显的原因。实验结果表明,激光预处理技术对粗抛表面的提升作用并不明显,但是可以大幅度抑制精抛表面的损伤点密度。在本文的实验条件下,晶体表面的抗激光损伤能力可以提升约 60%。比较体材料和精抛表面的预处理效果发现:当体材料的抗破坏能力通过预处理提升后,精抛表面的抗激光损伤能力也会提升,由此可见精抛表面的激光预处理效果与体材料性能相关。

关键词:激光损伤;激光预处理;损伤阈值;预处理效果;氘化磷酸二氢钾(DKDP)

中图分类号: TN249; TN244 **文献标识码:** A **doi:**10.3788/OPE.20172508.1987

Improvement of laser damage resistance at surface of DKDP crystal by laser conditioning process

LUO Yang^{1,2}, HU Guo-hang^{1*}, ZHAO Yuan-an^{1*}, YANG Liu-jiang¹,
CAO Zhen^{1,2}, LI Da-wei¹, LIU Xiao-feng¹

(1. Key Laboratory of Materials for High Power Laser, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

* Corresponding author, E-mail: huguohang@siom.ac.cn; yazhao@siom.ac.cn

Abstract: In view of damage characteristics of crystal surface, the effect of laser conditioning process on the laser induced surface damage threshold of DKDP crystals was determined by combining raster scan pre-exposure and real-time damage event imaging technique. By simulating dynamic process of different defects exposed to intense nanosecond laser pulse, the mechanisms of the effect of laser conditioning process on rough and well polished surfaces were discussed separately. The results show that laser damage density of well polished surface is remarkably decreased by the laser conditioning process while laser damage resistance of the rough polished surface cannot be improved. The laser damage resistance is increased by 60% under given experimental conditions. By comparing effects of laser condi-

收稿日期:2017-02-20;修订日期:2017-04-01.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 61405219, No. 11304328)

tioning process on the well polished surface to that in the bulk, it indicates that damage resistance on the surface can be improved when laser damage resistance in the bulk is increased by laser conditioning process. Thereby the effect of laser conditioning process on surface damage threshold is related to that of bulk material.

Key words: laser damage; laser conditioning; damage threshold; laser conditioning effects; doped deuterium KDP (DKDP)

1 引言

磷酸二氢钾(KDP)和氘化磷酸二氢钾(DKDP)晶体有较高的激光损伤阈值并且可以生长出大尺寸晶体,是仅有的可以满足美国利弗莫尔实验室(Lawrence Livermore National Laboratory, LLNL) NIF 点火装置和法国兆焦耳激光器(LMJ)等大口径高功率激光系统运行的非线性光学晶体材料,其抗激光损伤能力是限制系统运行通量的主要因素。晶体元件抗激光损伤能力提升的后期处理方式包括热退火和激光预处理。由于DKDP晶体的相变点较低,据Guillet^[1]报道,70%氘化DKDP晶体在140℃就会发生晶相变化,所以不能采用热退火处理,激光预处理方法较为合适。实验结果表明,它可以将材料的损伤阈值提高至1.5~2.5倍^[2]。美国LLNL实验室在2007年时搭建的亚纳秒紫外激光预处理平台使用500 ps激光成功将DKDP晶体体材料的抗损伤能力提升至2.5倍^[3]。

激光预处理的主要过程是:利用能量低于材料损伤阈值的激光辐照光学元件,从而提升光学元件的抗损伤能力。多年来,激光辐照提升损伤阈值的机理一直是研究热点,主要有激光清除机制^[4]、激光加热退火机制^[5]以及激光消除电子缺陷机制^[6]3种理论模型。国内中科院上海光学精密机械研究所一直从事激光预处理技术的研究工作。利用在线探测技术,研究人员发现在对晶体材料进行激光预处理后,激光透射率有了一定变化,这是由于激光预处理后材料的散射中心与吸收中心的密度发生了改变^[7],之后进一步在时域分析激光辐照时的热过程,确认局部的快速升温与缓慢降温能够减少缺陷密度^[2]。

目前,国内外主要关注激光预处理技术对KDP/DKDP晶体体材料的抗破坏能力的提升作用,但是对于晶体加工表面的影响未见报道。本

文采用紫外激光对DKDP晶体进行光栅扫描预处理加工表面,结合表面快速成像方法提供的元件表面的实时高分辨率图片,得到预辐照前后元件表面在强激光辐照下的损伤点密度,分析激光预处理对粗抛和精抛加工表面的抗激光损伤能力的提升作用,确定激光预处理对晶体表面的提升效果及机理。

2 实验装置

2.1 激光损伤测试和预处理设备

激光预处理和损伤测试装置光路如图1所示,光源使用Nd:YAG激光发出的355 nm紫外光,频率为10 Hz,激光近高斯脉宽约为8 ns。由半波片和偏振片组成的能量衰减器可以调节激光能量密度,而光束经由聚焦元件聚焦到样品表面,焦距为5 000 mm,由光束分析仪测量获得样品上光斑的有效面积为0.23 mm²。白光光源经准直后照明样品表面,显微镜镜头与CCD相机组成图像采集系统,显微镜镜头焦点定于样品表面,对样品表面成像。每次激光脉冲辐照后,表面探测系统^[8]采集一幅高分辨率图像,其分辨率约为10 μm。

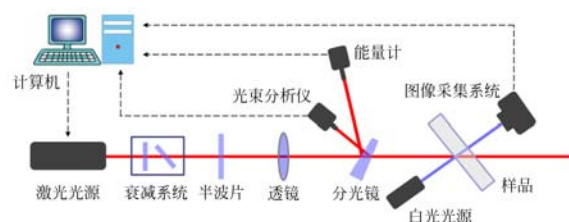


图1 激光损伤测试光路图

Fig. 1 Schematic diagram of laser damage test

使用光栅扫描法对DKDP晶体样品进行辐照,单次扫描区域面积为1 cm²,相邻光斑间距满足覆盖待测区域的激光能量为最高能量的90%。

在光栅扫描过程中,表面损伤自动探测系统自动判断损伤的出现情况,并记录损伤点的尺寸及位置信息。

2.2 表面损伤自动探测系统

光栅扫描损伤测试时,样品台处于移动过程中,激光辐照频率为 10 Hz。为了探测损伤,需要确定辐照区域在辐照前后的变化情况,因此在每次晶体元件移动、激光脉冲辐照之后,表面探测系统都会采集一幅样品表面的高分辨率图像。损伤探测系统通过对比某一区域在激光脉冲照射前后的照片,可以确定损伤事件的发生,例如新出现的损伤点以及已有损伤点的再次生长。图 2 显示了自动损伤探测系统的工作过程,上下两图分别是第(N-1)次及第 N 次激光脉冲照射后捕捉的图像,图中矩形区域表示连续两张图像中的相同位置,可以看出图 2(a)中存在一个缺陷诱导损伤。

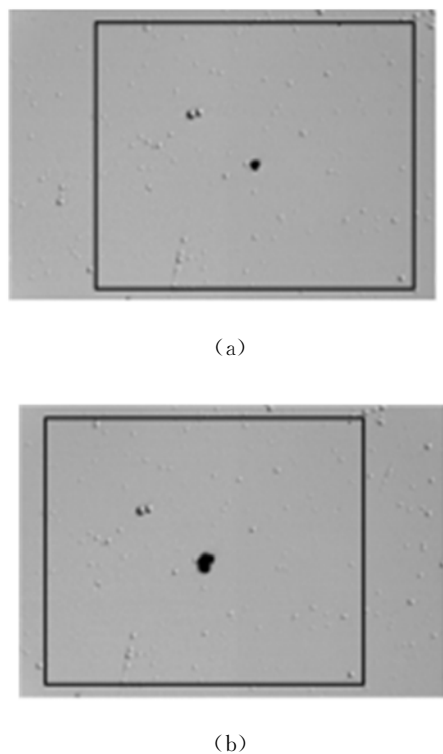


图 2 (a)第(N-1)次脉冲后捕捉的图像与(b)第 N 次脉冲后捕捉的图像。矩形区域是两张连续图像中的相同区域

Fig. 2 Images captured after pulse irradiation for (a) (N-1) and (b) N times. Box represents the same area in two consecutive images captured while optics were moving

3 实验结果

DKDP 晶体在表面加工过程中经常会在材料表面引入一些较为严重的加工缺陷,比如尺度为 $100\ \mu\text{m}$ 左右的压痕,这些压痕不仅尺寸大,而且往往在压痕表面以及压痕内部伴随着大量向外延伸的裂纹,这些大尺寸宏观缺陷极易引起损伤,它在较低能量密度辐照下(如 $3\ \text{J}/\text{cm}^2$)即可产生破坏,并且会沿着裂纹迅速生长,如图 3 所示。这些大尺寸加工缺陷严重限制了晶体表面的负载能力,在这种情况下晶体损伤阈值主要受表面加工情况的影响,与材料特性关系不大;而且这些加工缺陷的深度较深,后续加工很难将其去除,因此加工需要控制这种缺陷的产生。为了避免加工缺陷对实验结果的影响,实验中辐照区域均避开了表面压痕等大尺寸缺陷。

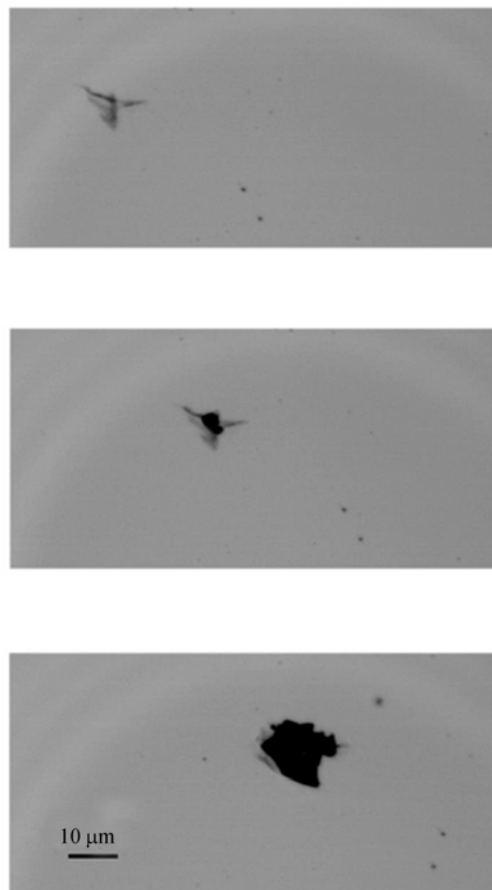


图 3 表面压痕引起损伤并快速生长

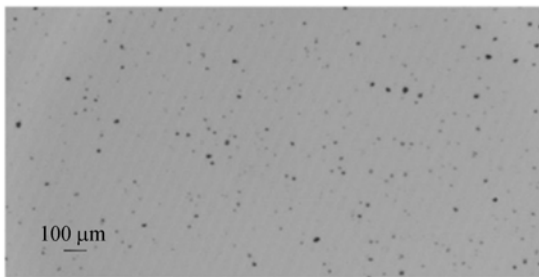
Fig. 3 Growth process of damage induced by surface indentation

3.1 不同加工表面预处理效果

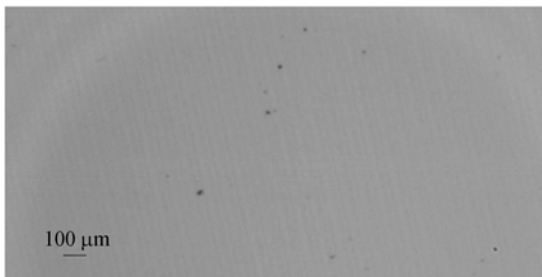
3.1.1 粗抛加工表面预处理效果

DKDP 样品经粗抛工艺加工后,表面疵病仍然较多,由表面探测系统(见图 1)可以得到其表面形貌如图 4 所示。可见粗抛后样品表面存在较多的坑点,尺寸较大,且坑点密度不一,图 4(a)中坑点密度约为 300 个/ mm^2 ,而图 4(b)中坑点密度约为 20 个/ mm^2 。本文避开表面压痕后,研究激光预处理对粗抛工艺的影响。

实验中分别测试粗抛后 DKDP 晶体样品预处理前后的抗损伤能力。实验过程如下:选择逐级上升的多个能流台阶,能流台阶间隔约为 1.5 J/cm^2 。在样品表面选择多个 1 cm^2 的区域,每个区域只使用一个能流台阶的激光光栅扫描一次,损伤探测系统获取每个区域的损伤情况,即得到未预处理时损伤点密度与激光能量密度的关系;然后,在样品表面另选一个 1 cm^2 的区域,由低到高地使用以上能流台阶的激光分别光栅扫描该区域一次,损伤探测系统获取每次扫描时的损伤情况,即得到预处理后损伤点密度与激光能量密度的关系。实验结果如图 5 所示,可见激光预处理前后,损伤测试中相同能量密度激光诱导产生的损伤点密度差别较小,损伤点未被抑制,因此激光预处理并不能提升粗抛加工表面的抗损伤能力。



(a) 密度较高
(a) High density



(b) 密度较低
(b) Low density

图 4 粗抛表面存在密度不一的表面坑点
Fig. 4 Pits on rough polished surface

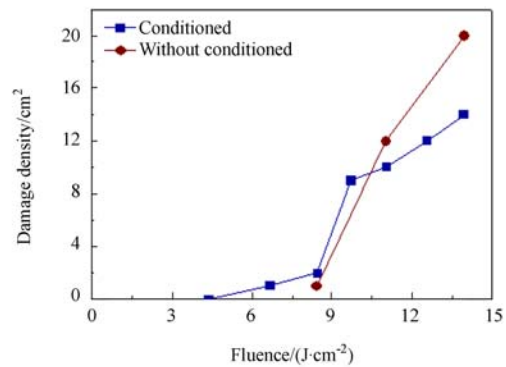


图 5 粗抛表面的预处理效果与未处理效果分析

Fig. 5 Comparison of rough polished crystals before and after conditioning

3.1.2 精抛加工表面预处理效果

DKDP 样品经精抛工艺加工后,表面疵病明显减少,由表面探测系统得到其表面形貌如图 6 所示。可见精抛后表面坑点减少,密度约为 $0\sim 5$ 个/ mm^2 ,且尺寸减小。本文避开表面压痕后,研究激光预处理对经精抛工艺加工后样品表面的影响。

实验过程与研究粗抛加工表面预处理效果相同,选择多个区域分别进行有无激光预处理时晶体表面的损伤测试,实验结果如图 7 所示。可以发现激光预处理的效果非常明显,未预处理区域在激光能量密度为 11.1 J/cm^2 时即出现破坏,而预处理区域直到 19.3 J/cm^2 时才出现破坏。多块样品统计结果表明,激光预处理使 DKDP 晶体的功能损伤阈值提升了约 60%,由此可见对于精抛加工表面,激光预处理对损伤点的抑制效果明显,可有效提升晶体的抗损伤能力。

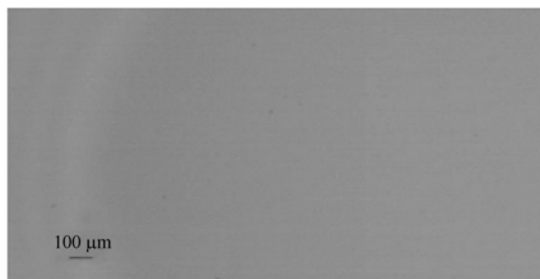


图 6 精抛处理后 DKDP 晶体表面在线探测图像

Fig. 6 Real-time image of fine polished DKDP crystal surface

以上两组实验结果表明,粗抛后样品表面仍存在较多坑点,而精抛可以有效提升表面质量,坑

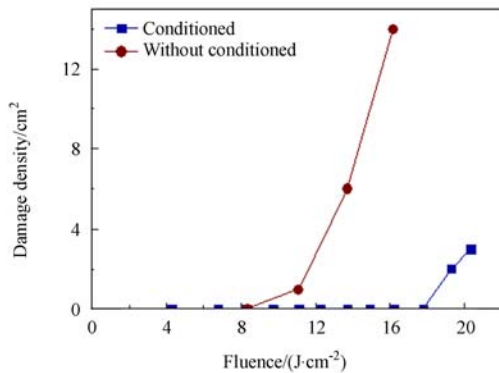


图 7 精抛处理表面的预处理效果与未处理效果对比
Fig. 7 Comparison of fine polished crystals before and after conditioning

点密度明显降低。激光预处理对经精抛工艺加工后坑点较少的 DKDP 样品表面有较明显的提升作用;而对于粗抛加工后坑点仍较多的 DKDP 样品表面和较为严重的表面加工缺陷,比如压痕等,则不具有抑制作用。

3.2 体材料和表面抗激光损伤能力的关联性

由上述实验结果可知,激光预处理技术不仅可以提升体材料的抗损伤能力,也可以提升精抛表面的抗损伤能力。为了进一步认识激光预处理技术对表面的提升效果,本文测试了不同抗破坏能力晶体材料经过预处理后表面的提升效果,分析体材料和表面抗激光损伤能力的关联性,结果如图 8 所示。由图可知,体内抗破坏能力较高时,采用相同精抛工艺加工,表面的抗破坏能力也会相对较高,可见表面抗破坏能力与材料特性有很大的关联。当体材料抗破坏能力提升后,表面抗破坏能力也会有很大的提升。

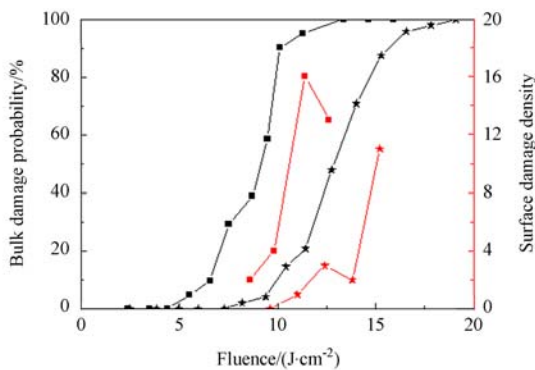


图 8 表面损伤密度与体内损伤概率的关系
Fig. 8 Relation between surface damage density and bulk damage probability

4 结果讨论

由实验结果可知,激光预处理对 DKDP 晶体精抛加工表面有较大的提升效果,但对粗抛加工表面却基本没有提升效果。

激光预处理的主要过程^[2]为:在使用强激光辐照 KDP 类晶体前,首先使用能量低于晶体损伤阈值的激光辐照晶体,热效应产生的修复机制可以有效提升晶体的激光损伤阈值。当预处理激光辐照到晶体时,晶体中的杂质缺陷等部位会吸收激光能量,温度上升,而缺陷周围的基质则会通过热传导被间接加热。脉冲作用之后,缺陷及周围的温度通过热传导逐渐降低。这个过程可以通过热扩散方程求解:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = D \Delta T, \quad (1)$$

式中 D 是热扩散率, $D = \kappa_0 / \rho_0 C_0$, 其中 κ_0 是晶体热导率、 ρ_0 是晶体密度、 C_0 是晶体热容。利用边界条件^[2]求解该方程,根据参考文献[10],激光辐照过程中及辐照后缺陷点的温度方程为:

$$T(r, t) = T_0 + \frac{2aT_+}{r\sqrt{\pi}} \int_{\beta}^{\infty} \left\{ 1 - \exp\left[-\frac{t}{\tau_p} \left(1 - \frac{\beta^2}{x^2}\right)\right] \right\} \exp(-x^2) dx \quad (t \leq \tau), \quad (2)$$

$$T(r, t) = -\frac{2LT_{\max}}{\pi r} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n} \sin \frac{n\pi r}{a} \times \exp(-kn^2\pi^2 t/L^2) \quad (t > \tau), \quad (3)$$

式中: $T_+ = I\alpha a/4\kappa_0$, 是缺陷处最终的温度升高值; $\tau_p = a^2 \rho C/3\kappa_0$, 是到达最终温升所需要的时间; $\beta = (r-a)(4Dt)^{1/2}$, 是一个无量纲参数; ρ 和 C 分别是缺陷的密度和热容; $I(t)$ 是激光强度; a 是缺陷半径; α 是缺陷对激光能量的吸收率; τ 是脉冲持续时间。

实验中所使用的激光脉冲持续时间 $\tau = 8 \text{ ns}$ 、能量密度为 10 J/cm^2 , DKDP 晶体的热导率 $\kappa_0 = 2.0 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, 缺陷半径 $a = 100 \text{ nm}$, 材料密度与热容乘积 $\rho C = 1.88 \times 10^6 \text{ J} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$, 吸收率为 $0.005/2$ ^[16], 则一个脉冲后,缺陷处的温度曲线如图 9 所示。激光辐照过程中,温度会迅速上升,当激光辐照过后,温度会缓慢降至室温。因此,激光预处理过程实际上可看成是一个快速

升温缓慢降温的局部热退火过程。

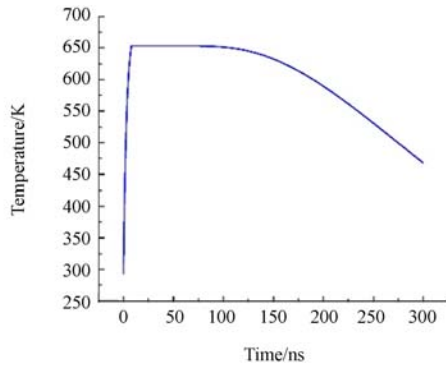


图 9 一个激光脉冲后缺陷处的温度变化曲线

Fig.9 Variation of defect temperature after one laser pulse

缺陷部位吸热导致的快速升温使得缺陷部位发生相变,可能产生激光诱导热熔融和激光诱导热蒸发。由于晶体的蒸发潜热通常远大于熔融潜热(蒸发潜热通常是熔融潜热的 20~50 倍^[12]),所以蒸发是材料表面形变的主要方式。

蒸发速率由表面温度决定,其表达式为^[12]:

$$v = v_0 \exp\left[-\frac{U}{k_B T}\right], \quad (4)$$

其中: k_B 是波尔兹曼常数, $k_B = 8.617 \times 10^{-5}$ eV/K; U 为蒸发潜热, v_0 是一个常数。本文中^[13] $U = 3.6$ eV, $v_0 = 3.8 \times 10^3$ m/s。

由图 9 可知,当激光辐照加工缺陷处时,缺陷处的温度会先快速上升到约 650 K,之后再缓慢降至室温。将 $T = 650$ K 带入式(4)中,得到该温度时缺陷处的蒸发速度 $v = 4.6 \times 10^{-25}$ m/s,该温度会保持约 150 ns,故一个脉冲时间内表面蒸发的厚度仅为 $H = 6.9 \times 10^{-32}$ m,可忽略不计,远小于加工缺陷的尺度(大于数十微米),所以预处理激光对加工缺陷不能起到去除或者钝化的功能,加工裂纹依然存在。

DKDP 样品表面存在多种缺陷^[9],主要包括点缺陷、线缺陷,杂质包裹体,加工引起的坑点、划痕、裂纹等。点缺陷主要是空位、间隙、Frenkel 缺陷等(如氢空位和间隙),线缺陷主要是位错。杂质包裹体是 KDP 类晶体生长过程中最常见的体材料缺陷,是由于平台微扰和外来杂质进入在晶体柱面上形成的一种宏观缺陷,其中大多数为液相包裹体,在强激光作用下极有可能诱发光散射。坑点与划痕则多是由于后期加工引起的表面缺陷,而尺寸及深度较大的坑点与划痕甚至伴随

有延展向四周的裂纹。裂纹的存在不仅破坏了材料的完整结构,降低材料的力学性能^[19],还会对入射激光造成调制,使局部光场增强,从而严重影响晶体表面的抗损伤能力^[20]。

对于上述多种缺陷,激光预处理引起的快速升温缓慢降温这一热退火过程可以有效消除点缺陷与杂质包裹体^[14,17-18]。在恢复至室温的过程中,晶体相变使晶格结构重排,空位、间隙等缺陷得以复合且可以使包裹体中的过饱和溶液再生长从而得以消除。同时由上述计算可知,纳秒脉冲激光预处理的热熔融和热蒸发效果太小,引起的表面形变非常微弱,不能改变材料表面的宏观形貌,即不能修复坑点、划痕以及裂纹,也不能起到钝化的作用。但精抛后表面存在的坑点和划痕尺寸较小、深度较浅且不存在裂纹,这类缺陷对强激光能量的调制效应及吸收作用小,其抗激光损伤能力仍取决于体材料的抗损伤能力。如图 8 所示,DKDP 晶体体材料和表面抗损伤能力有很强的关联性,因此当激光预处理修复晶体表面点缺陷与杂质包裹体从而提升体材料抗破坏能力时,尺寸较小的坑点与划痕处的抗激光损伤能力也随之提升,所以激光预处理对精抛加工表面有较大的提升效果。而粗抛后表面存在的坑点和划痕尺度较大、深度较深,其周围更有向外扩展的裂纹,决定裂纹抗激光损伤能力的主要因素并不是点缺陷与包裹体这些微观结构,而是裂纹处的宏观不规则结构。它们降低了材料的力学性能并调制引起光场增强,同时裂纹本身也存在吸收特性,因此大幅降低了裂纹处的激光损伤阈值,而强激光引起的瞬时局部升温并不足以改变 DKDP 晶体材料表面的宏观结构,因此裂纹不能去除或者钝化,即对裂纹结构特性没有改变。由此可知,激光预处理对粗抛加工表面基本没有提升效果。

5 结 论

本文研究了激光预处理对 DKDP 晶体加工表面的提升作用。从激光预处理对粗抛和精抛晶体表面的效果分析,当加工较差(如表面坑点密度较多、尺寸较大)或者局部存在较为严重的表面压痕时,激光预处理效果较差,因此激光预处理对加工引起的表面缺陷提升效果并不明显;但是当表面加工较好,加工缺陷较少时,激光预处理对表面

的提升效果就非常明显。在本文的实验条件下,晶体表面的抗激光损伤能力可以提升约 60%;此外,晶体材料和表面抗损伤能力体现出很强的关联性。所以,在 DKDP 晶体的生长过程中应尽量提升材料素质,有助于提升表面抗激光损伤能力;此外,激光预处理应该放在对晶体精抛处理之后。

参考文献:

- [1] GUILLET F, BERTUSSI B, LAMAINÈRE L, *et al.*. Effects of thermal annealing on KDP and DKDP on laser damage resistance at 3ω [J]. *SPIE*, 2010, 7842: 78421T.
- [2] HU G H, ZHAO Y N, LI D W, *et al.*. Transmittance increase after laser conditioning reveals absorption properties variation in DKDP crystals[J]. *Optics Express*, 2012, 20(22): 25169-25180.
- [3] ADAMS J J, JARBOE J A, FEIT M D, *et al.*. Comparison between S/1 and R/1 tests and damage density vs. fluence ($\rho(\varphi)$) results for unconditioned and sub-nanosecond laser-conditioned KD_2PO_4 crystals[J]. *SPIE*, 2007, 6720: 672014.
- [4] ARENBERG J W, MORDAUNT D W. Experimental investigation on the role of wavelength in the laser conditioning effect[C]. *Laser Induced Damage in Optical Materials*, NBS, 1989: 516-519.
- [5] STEWART A F, GUENTHER A H, DOMANN F E. The properties of laser annealed dielectric films [C]. *Laser Induced Damage in Optical Materials*, NBS, 1988: 369-387.
- [6] WOLFE C R, KOZLOWSKI M R, CAMPBELL J H, *et al.*. Laser conditioning of optical thin films [C]. 1989 *Boulder Damage Symposium, Lawrence Livermore National Lab.*, 1989: 360-375.
- [7] WANG Y L, ZHAO Y N, HU G H, *et al.*. Mitigation of scattering defect and absorption of DKDP crystals by laser conditioning[J]. *Optics Express*, 2015, 23(12): 16273-16280.
- [8] WOLFE J E, SCHRAUTH S E. Automated laser damage test system with real-time damage event imaging and detection [J]. *SPIE*, 2006, 6403: 640328.
- [9] HU G H, ZHAO Y N, SHAO J D, *et al.*. Real-time damage event imaging reveals the absorber inducing laser damage with low density in solgel antireflective coatings[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2013, 30(5): 1186-1193.
- [10] CHAN C H. Effective absorption for thermal blooming due to aerosols [J]. *Applied Physics Letters*, 1975, 26(11): 628-630.
- [11] CARSLAW H S, JAEGGER J C. *Conduction of Heat in Solids*[M]. 2nd ed., London: Oxford University Press, 1959.
- [12] ANISIMOV S I, KHOKHLOV V A. *Instabilities in Laser-matter Interaction* [M]. Boca Raton: CRC Press, 1995.
- [13] FEIT M D, RUBENCHIK A M. Mechanisms of CO_2 laser mitigation of laser damage growth in fused silica[J]. *SPIE*, 2003, 4932: 91-102.
- [14] ZAITSEVA N, ATHERTON J, ROZSA R, *et al.*. Design and benefits of continuous filtration in rapid growth of large KDP and DKDP crystals[J]. *Journal of Crystal Growth*, 1999, 197(4): 911-920.
- [15] 孙洵, 张艳珍, 高顺清, 等. 包裹体对 KDP 晶体光损伤阈值的影响[J]. *压电与声光*, 2004, 26(6): 485-487.
- SUN X, ZHANG Y ZH, GAO SH Q, *et al.*. Effect of inclusions on laser damage of KDP crystals[J]. *Piezoelectrics & Acousto-optics*, 2004, 26(6): 485-487. (in Chinese)
- [16] DYAN A, POMMIES M, DUCHATEAU G, *et al.*. Revisited thermal approach to model laser-induced damage and conditioning process in KH_2PO_4 and $\text{D}_{2-x}\text{KH}_{2(1-x)}\text{PO}_4$ crystals[J]. *Proceedings of SPIE*, 2006, 6403: 640307.

- [17] DUCHATEAU G. Modeling laser conditioning of KDP crystals[J]. *SPIE*, 2009, 7504: 75041K.
- [18] MARSHALL C D, PAYNE S A, HENESIAN M A, *et al.*. Ultraviolet-induced transient absorption in potassium dihydrogen phosphate and its influence on frequency conversion[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 1994, 11(5): 774-785.
- [19] GENIN F Y, SALLEO A, PISTOR T V, *et al.*. Role of light intensification by cracks in optical breakdown on surfaces[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2001, 18(10): 2607-2616.
- [20] GRIFFITH A A. The phenomena of rupture and flow in solids[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 1921, 221(582-593): 163-198.

作者简介:



罗 阳(1993—),男,湖北人,2015 年于华中科技大学获得学士学位,主要从事 KDP/DKDP 晶体激光损伤及预处理机制方面的研究。E-mail:luoyang@siom.ac.cn



赵元安(1976—),男,陕西人,研究员,博士生导师,2001 年于四川大学获得硕士学位,2005 年于中科院上海光机所获得博士学位,主要从事强激光与光学材料相互作用的研究。E-mail:yazhao@siom.ac.cn

导师简介:



胡国行(1983—),男,浙江人,博士,副研究员,硕士生导师,2006 年于浙江大学获得学士学位,2011 年于中科院上海光机所获得博士学位,主要从事强激光与物质相互作用方面的研究。E-mail:huguohang@siom.ac.cn