



·光学元件激光损伤·

355 nm 和 1064 nm 激光辐照下 DKDP 晶体的表面损伤特性*

史晋芳¹, 邱 荣², 郭德成², 周 磊², 蒋 勇²,
周 强², 余 健¹, 陈元攀², 谢 准²

(1. 西南科技大学 制造过程测试技术教育部重点实验室, 四川 绵阳 621010;

2. 西南科技大学 极端条件物质特性联合实验室, 四川 绵阳 621010)

摘 要: 利用 Nd:YAG 激光器研究了 DKDP 晶体元件在激光辐照下的表面损伤特性, 对比研究了 355 nm 和 1064 nm 激光辐照下晶体元件的表面损伤形貌, 分析了每种损伤形貌对应的前驱体和损伤机制。研究结果表明: 相对于体损伤, 晶体的表面损伤更加复杂, 在脉宽约 10 ns、损伤概率小于等于 50% 的激光能量密度辐照下, DKDP 晶体的表面损伤主要有带坑底空腔损伤坑、表面损伤裂纹、平底损伤坑、表面烧蚀四种典型形貌。通过光学显微镜和扫描电子显微镜的成像和分析发现: 带坑底空腔损伤坑和表面损伤裂纹的前驱体都是晶体体缺陷, 平底损伤坑的前驱体则可能是表面加工裂纹、裂纹内碎屑、表层体缺陷等中的一种或多种, 表面烧蚀主要由表面污染和浅表层缺陷形成。与熔石英光学元件一样, 表面损伤仍然是晶体元件抗激光辐照损伤的薄弱环节。

关键词: 激光诱导表面损伤; DKDP 晶体; 损伤形貌; 材料体缺陷; 表面加工缺陷

中图分类号: TP244

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202335.220419

Investigating surface damage characteristics in DKDP crystals by laser irradiation at 355 nm and 1064 nm

Shi Jinfang¹, Qiu Rong², Guo Decheng², Zhou Lei², Jiang Yong²,
Zhou Qiang², Yu Jian¹, Chen Yuanpan², Xie Zhun²

(1. Key Laboratory of Testing Technology for Manufacturing Process of Ministry of Education,

Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China;

2. Joint Laboratory for Extreme Conditions Matter Properties, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China)

Abstract: The surface damage characteristics in DKDP crystals under laser irradiation at 355 nm and 1064 nm were studied and compared by using a Nd: YAG laser. The damage precursors and mechanisms corresponding to each damage morphologies were analyzed. The damage results reveal that the surface damage in DKDP crystal is more complex than that in bulk damage. Under the irradiation laser corresponding to the pulse width of 10 ns and the damage probability at 0% – 50%, surface damage morphology in DKDP crystals mainly contained four typical damage morphology: crater with cavity, crater with flat bottom, surface damage crack, and surface ablation. Through the comparison and analysis of the imaging of optical microscope and scanning electron microscope, damage precursors that induced damage craters with bottom cavity and surface cracks were mainly bulk defects, which were the same as the precursors forming the internal damage points (pinpoints). The precursors that induced damage craters with flat bottom were relatively complex, which could be the surface contamination, surface cracks, machining defects, and shallow surface bulk defects. For surface ablation, it was mainly caused by surface contamination and surface absorption defects. Surface damage is still one of the important factors limiting the laser damage resistance of KDPD crystals.

* 收稿日期: 2022-12-21; 修订日期: 2023-03-24

基金项目: 国家自然科学基金委员会与中国工程物理研究院联合基金项目 (U1530109); 国家自然科学基金项目 (11972313)

联系方式: 史晋芳, 603071939@qq.com。

通信作者: 邱 荣, 43951700@qq.com。

Key words: laser-induced surface damage, DKDP crystal, damage morphology, material bulk defect, surface processing defect

磷酸二氢钾(KDP)的氘化产物磷酸二氘钾(DKDP)晶体,因其具有高透光性、优良的非线性系数、易于快速和大尺寸生长、低的横向受激拉曼散射效应等优点,是目前ICF激光驱动器装置中用于谐波转换的首选材料^[1-3]。但是DKDP晶体元件相对较低的抗激光辐照损伤能力限制了装置运行通量的进一步提升^[4-5],影响了装置的运行效率和运行稳定性。由于生长过程复杂、周期长,DKDP晶体材料难以避免地存在如杂质、微生物、本征结构缺陷和电子缺陷等体缺陷。近年来,随着精确控制生长温度、采用超纯和超饱和原料、紫外杀菌、超细连续过滤、激光预处理等技术手段的使用,晶体材料的体缺陷已得到有效控制,晶体元件的体损伤阈值和损伤点密度得到明显改善^[6-8]。但是,由于DKDP晶体属于软脆材料,在表面加工、安装和使用过程中,表面/亚表面会产生划痕、裂纹、残余应力等表面缺陷和表面污染^[9-10],而且也总有体缺陷会位于元件表面/亚表面。在激光特别是紫外激光辐照下,这些表面缺陷、表面污染和体缺陷会通过热吸收、非线性吸收、干涉光强增强、降低材料机械性能等方式产生表面损伤。

国内外科学家们在KDP和DKDP晶体的表面加工^[11]、表面修复^[12]、表面损伤形貌^[13-14]、表面损伤机制^[15-18]、预处理^[19-21]等方面开展了大量研究,解决了工程应用中出现的大部分问题,但在表面缺陷的种类、来源、损伤机制和消除方法等方面仍然存在争议。为探索DKDP晶体在激光辐照下的表面损伤机制,本文对比研究了355 nm和1064 nm激光辐照下晶体表面的典型损伤形貌,分析了每种损伤形貌对应的损伤前驱体种类和损伤机制。对DKDP晶体表面损伤规律的研究,将有助于了解晶体的激光辐照损伤机理,有助于改进晶体的生长、加工和后处理工艺,进而提高晶体元件的抗激光损伤能力。

1 实验系统及实验方法

1.1 实验系统及实验样品

实验系统如图1所示,Nd:YAG调Q激光器(Spectra-Physics, LAB-190-10)输出基频(1ω , 1064 nm, 约12 ns)和三倍频(3ω , 355 nm, 约9 ns)激光脉冲,由分光镜完成谐波分离与合束;半波片(HWP)和偏振片(POL)组成能量调节系统;透镜用于聚焦和控制靶面光斑大小,靶面为近高斯光斑,靶面光斑尺寸采用刀口法测量, 1ω 和 3ω 的光斑直径分别约为500 μm 和400 μm ;能量计用于测量和监控脉冲能量;光束质量分析仪(Newport, LBP2-HR-VIS2)用于获取光斑形貌;电控平移台用于固定和移动实验样品;单筒显微镜(Nikon SMZ18)与CCD1、CCD2用于监测晶体前后表面的损伤情况,CCD3用于晶体体损伤监测和成像;He-Ne激光用于指示和体损伤散射成像照明。

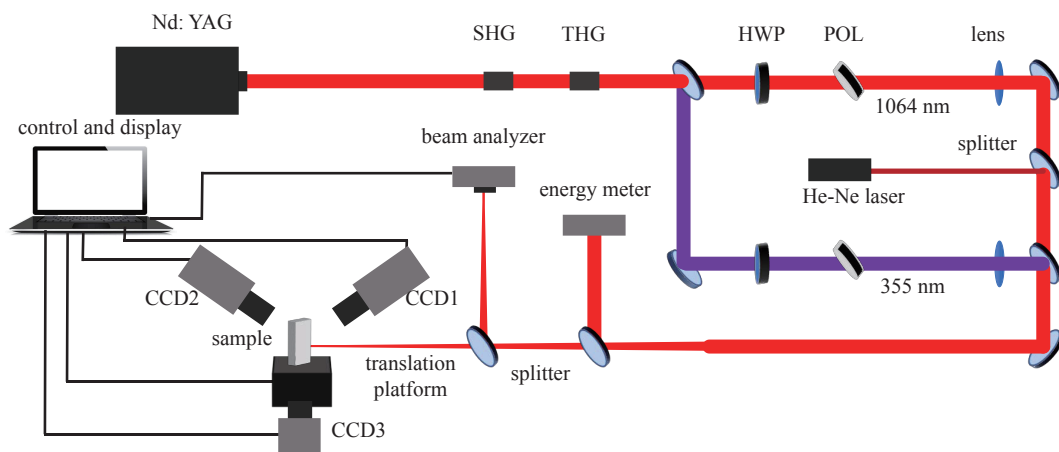


Fig. 1 Schematic of laser induced damage experimental system

图1 晶体损伤测试实验系统示意图

实验样品为单槽降温快速生长DKDP晶体,Ⅱ类三倍频切割,氘化率为70%,尺寸为50 mm×30 mm×10 mm和10 mm×10 mm×5 mm(其中前者主要用于进行损伤测试,后者主要用于对损伤形貌进行扫描电子显微镜成像),晶体表面采用单点金刚石飞切加工。

1.2 实验方法

用于损伤研究的实验样品在进行预处理前,均先选取实验区进行损伤阈值测试以比较和确定预处理效果,然

后在余下区域进行激光辐照预处理并开展损伤研究。本文主要研究经激光辐照预处理后的晶体表面损伤特性。预处理在 3ω (355 nm、10 Hz、约 9 ns) 辐照下进行, 对实验区采用光栅式扫描, 光斑间重叠比例为 90%, 能量密度按 7.4、9.2、11.0、12.8 和 14.6 $\text{J}\cdot\text{cm}^{-2}$ 的顺序依次递增; 预处理后采用 1-on-1 辐照方式进行损伤测试, 分别研究了 3ω 和 1ω 辐照下的损伤规律, 记录了损伤发生次数和损伤位置(前表面、后表面或体内)。为减少晶体表面因损伤造成的污染, 损伤概率控制在小于等于 50% 的范围。使用光学显微镜(OM)对表面损伤形貌进行离线成像, 使用扫描电子显微镜(SEM)对筛选后的典型表面损伤形貌进行成像。

2 实验结果

图 2 所示为预处理前后实验样品分别在 3ω 和 1ω 辐照下的损伤概率曲线(含体损伤和表面损伤)。预处理前后, 实验样品在 3ω 辐照下的损伤阈值分别为 13.7 和 16.6 $\text{J}\cdot\text{cm}^{-2}$, 在 1ω 辐照下的损伤阈值分别为 24.6 和 32.0 $\text{J}\cdot\text{cm}^{-2}$ 。在 3ω 激光辐照下, 损伤发生在表面的概率占总损伤次数的 12.2%, 其中前表面 4.8%, 后表面 7.4%; 在 1ω 激光辐照下, 损伤发生在表面的概率为 46.3%, 其中前表面 35.4%, 后表面 10.9%。

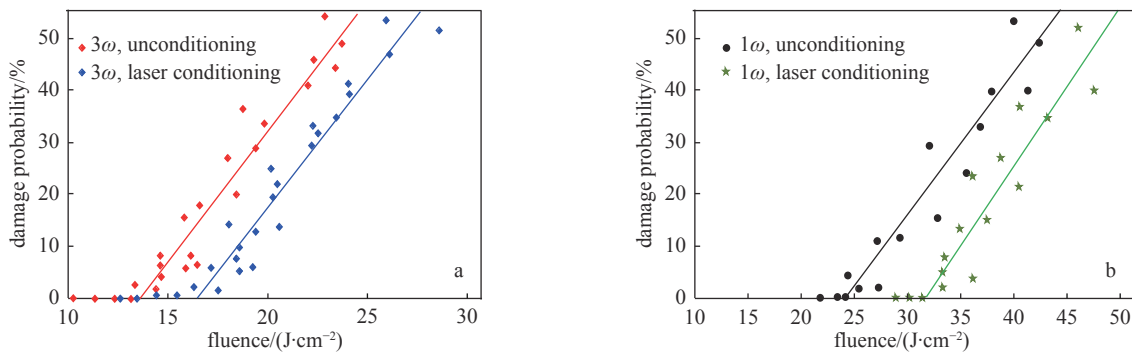


Fig. 2 Damage probability curves of DKDP crystals before and after laser conditioning

图 2 预处理前后 DKDP 晶体在 3ω 和 1ω 辐照下的损伤概率曲线

通过对晶体表面损伤进行细致的 OM 成像和 SEM 成像观察和分析, 发现在 3ω 和 1ω 激光辐照下, DKDP 晶体的表面损伤主要可分为带坑底空腔损伤坑、表面损伤裂纹、平底损伤坑和表面烧蚀四种典型形貌。

图 3 所示为带坑底空腔损伤坑的典型形貌。其中图 3(a) 出现在 3ω 辐照下的后表面, 图 3(b) 和图 3(c) 分别出现在 1ω 辐照下的后表面和前表面, 小图均为对应的 OM 透射成像; 图 3(a')、图 3(b') 和图 3(c') 为对应损伤坑的 SEM 成像, 小图均为坑底空腔放大图。这类损伤坑的主要特征是: (1) 元件表面材料脱落形成损伤坑, 损伤坑横向尺寸 $50\sim 200\ \mu\text{m}$; (2) 坑底均有一个空腔, 空腔内干净、无碎屑, 空腔外边沿有微颗粒物, 空腔直径 $5\sim 10\ \mu\text{m}$, 距表

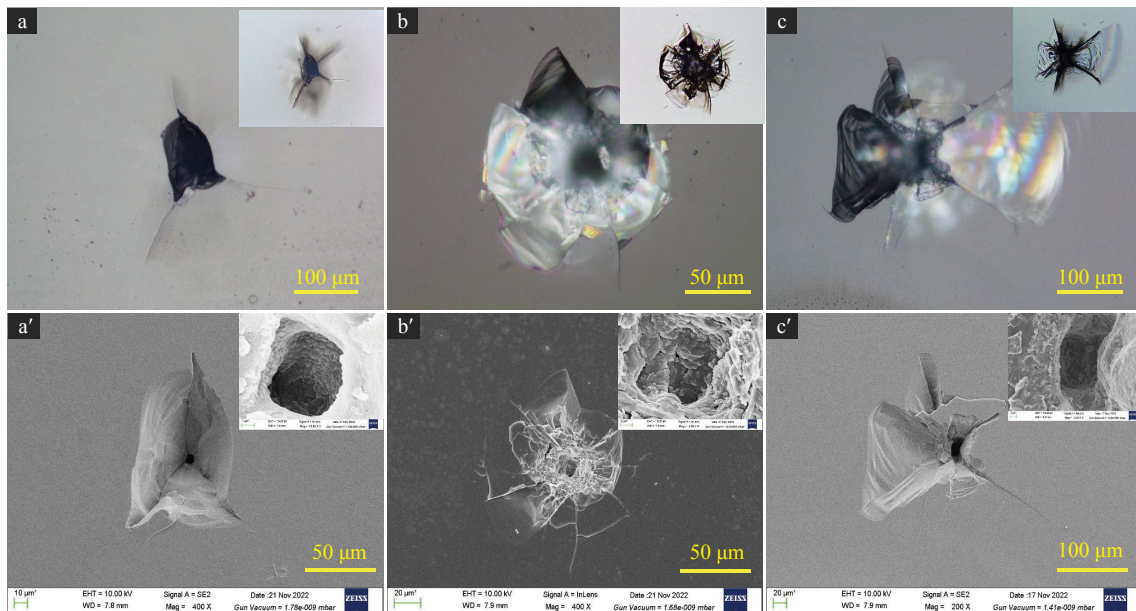


Fig. 3 Typical morphology of craters with cavity

图 3 带坑底空腔损伤坑的典型形貌

面深度 $15\sim 100\ \mu\text{m}$; (3) 损伤坑周围有大量裂纹, 裂纹以空腔为中心, 向表面和体内延伸, 裂纹的大小是损伤坑尺寸的 $2\sim 5$ 倍。

图 4 所示为表面损伤裂纹的典型形貌。其中图 4(a) 和图 4(b) 分别出现在 3ω 辐照下的后表面和前表面, 两图中的小图分别为 OM 透射成像和暗场成像, 图 4(a') 和 4(b') 为两图的 SEM 成像, 图 4(a') 中黄色箭头所指表面脱落为测试过程造成; 图 4(c) 和图 4(d) 均出现在 1ω 辐照下的后表面, 表面损伤裂纹在 OM 反射成像下不明显, 用黄色虚线标识(在图 4(c) 中右上小图和图 4(d) 中左下小图的红色箭头所指位置可以看到清晰裂纹), 图 4(c) 中箭头所指黑斑为后期污染, 小图均为 OM 透射成像, 右上小图的成像焦平面位于元件表面, 右下小图的成像焦平面为体内空腔处(表面下 $25\ \mu\text{m}$); 图 4(d) 中小图分别为 OM 暗场成像和透射成像。这类损伤形貌的主要特征是: (1) 表面损伤以裂纹形式出现, 表面裂纹有些是单条, 有些是多条交叉, 大多呈弧形, 长度 $50\sim 200\ \mu\text{m}$; (2) 部分表面裂纹不易被发现, 观察时需要多种成像方式联合使用; (3) 通过 OM 透射成像和暗场成像, 发现所有表面裂纹的附近均有复杂的体内裂纹, 且裂纹中央都有一个空腔(空腔在体内的位置如图中红色圆圈所示, 空腔在表面的对应位置如图中黄色圆圈所示), 裂纹以空腔为中心, 裂纹的形貌和分布与图 3 类似, 空腔距表面深度 $20\sim 100\ \mu\text{m}$ 。

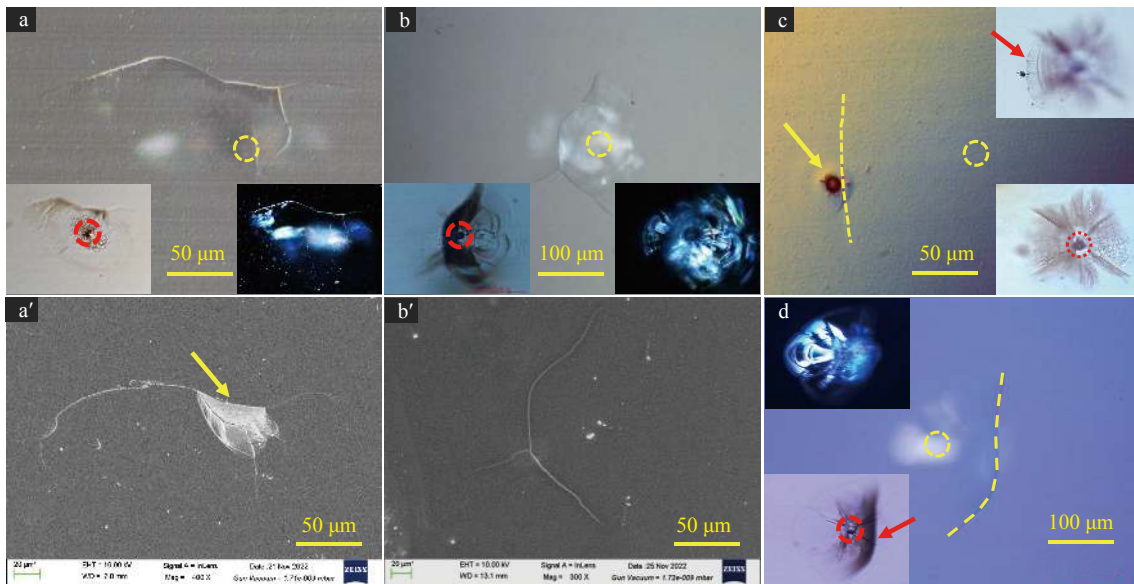


Fig. 4 Typical morphology of surface damage cracks

图 4 表面损伤裂纹的典型形貌

图 5 所示为平底损伤坑的典型形貌。其中图 5(a) 和 5(b) 分别出现在 3ω 辐照下的前表面和后表面, 图 5(c) 出现在 1ω 辐照下的前表面, 小图为对应损伤区的 OM 暗场或透射成像; 图 5(a')、图 5(b') 和图 5(c') 为对应损伤区的 SEM 成像, 图 5(b') 的小图为虚线方框区域的放大图。平底损伤坑的主要特征是: (1) 损伤坑形状多样化, 比较典型的形貌有如图 5(b) 所示的“I”字形貌, 其坑壁不光滑, 边沿不整齐; 以及如图 5(c) 所示的“贝壳”形貌, 其坑壁光滑, 边沿整齐; 这类损伤坑深度 $5\sim 50\ \mu\text{m}$, 横向尺寸 $50\sim 200\ \mu\text{m}$; (2) 损伤坑底较平, 但不规则, 无空腔; (3) 坑周围材料的体裂纹较少。

图 6 所示为表面烧蚀的典型形貌。其中图 6(a) 和图 6(c) 出现在 1ω 辐照下的前表面, 图 6(b) 和图 6(d) 出现在 1ω 辐照下的后表面, 图 6(d') 为图 6(d) 中央损伤坑的 SEM 成像, 图 6(d) 中的小图分别为损伤区的 OM 透射成像和损伤中央区域的高倍 OM 成像, 图 6(e) 出现在 3ω 辐照下的前表面。这类损伤形貌主要出现在 1ω 辐照下, 3ω 辐照下出现的几率较小。其主要特征是: (1) 表面烧蚀区大多呈圆形, 圆周外边沿有一暗环, 烧蚀区直径 $30\sim 500\ \mu\text{m}$; (2) 在单发激光辐照下, 光斑辐照范围内可能出现多个独立的烧蚀区; (3) 大部分表面烧蚀区中央有损伤微坑, 也有少部分无明显中央微坑; (4) 随损伤程度加重, 在烧蚀区会依次出现表面颜色变暗、周期微结构(如图 6(d) 中右下小图所示)、体内微裂纹、放射状裂纹、表面脱落形成损伤坑等形貌, 这与熔石英的表面烧蚀损伤形貌类似^[22-23]。

图 7 是预处理进行到 $11.0\ \text{J}\cdot\text{cm}^{-2}$ 时出现在晶体后表面的一个损伤形貌, 左图为 OM 反射成像, 右图为方框区域的 OM 透射成像。其具有非常特殊的表面损伤坑、表面损伤裂纹及复杂的体内损伤结构, 损伤区体内形成了 3 个吸收核, 其中 1 号吸收核形成了损伤微坑, 其距表面深度小于 $5\ \mu\text{m}$, 所有表面裂纹均始于该微坑; 2 号和 3 号吸收

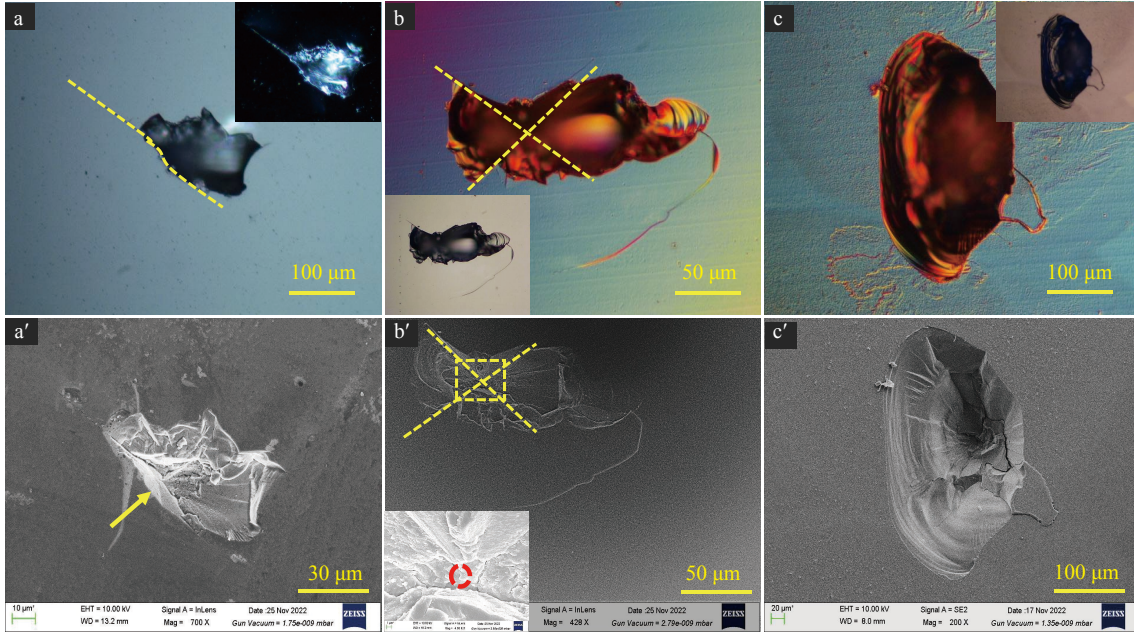


Fig. 5 Typical morphology of craters with flat bottom

图 5 平底损伤坑的典型形貌

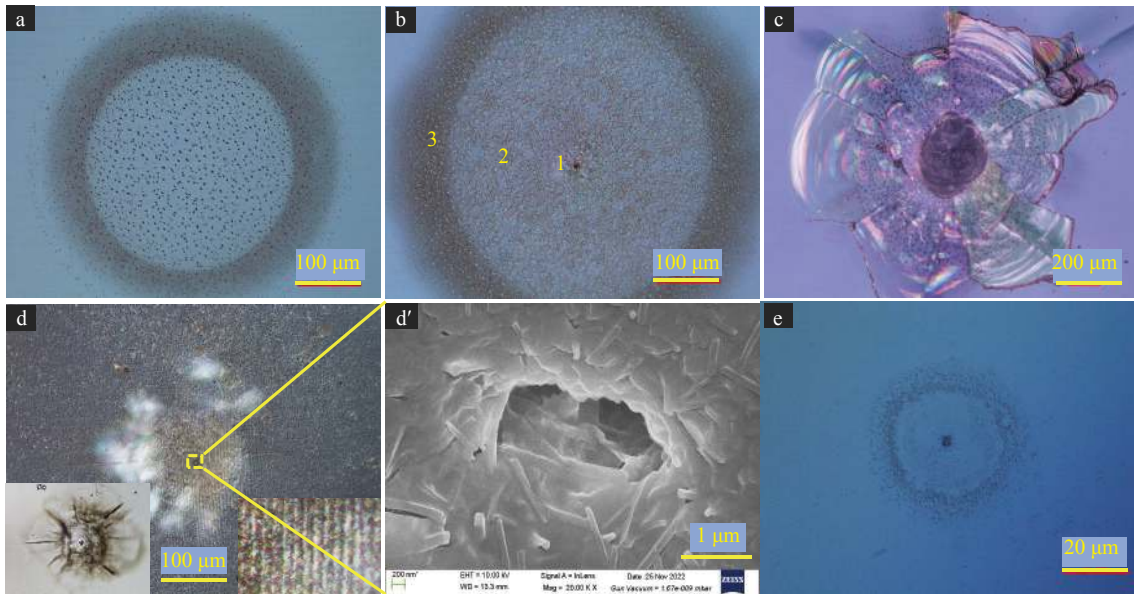


Fig. 6 Typical morphology of surface ablation

图 6 表面烧蚀的典型形貌

核距表面深度分别为 $12\ \mu\text{m}$ 和 $15\ \mu\text{m}$ 。

图 8(a) 和图 8(b) 分别是 3ω 和 1ω 辐照下 DKDP 晶体体内损伤点 (Pinpoint) 的典型形貌, 图 8(a') 和图 8(b') 是对应损伤区的 OM 暗场成像。体内损伤点由中央空腔和周围裂纹构成, 空腔直径 $5\sim 20\ \mu\text{m}$, 裂纹范围 $30\sim 200\ \mu\text{m}$ 。

3 分析与讨论

比较和分析图 3、图 4 和图 8 中各损伤形貌的整体特征, 虽然损伤形貌差异很大, 但它们具有相似的空腔和体内裂纹结构, 我们推测: 它们对应的损伤先驱体可能都是材料体缺陷, 而且体缺陷位于空腔中心。体缺陷吸收激光能量后

形成等离子体, 等离子体随后快速、高效地吸收激光能量, 变成高温高压等离子体球, 等离子体球烧蚀周围材料使

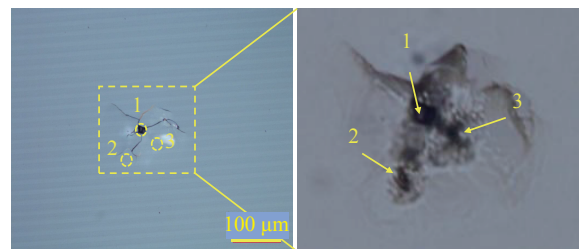


Fig. 7 Surface damage caused by bulk defect on the surface

图 7 表面体缺陷引起的表面损伤

其体积急剧膨胀,最终形成“爆炸”造成材料损伤。在该过程中,由体缺陷演化形成的高温等离子体球烧蚀形成了体内空腔,“爆炸”产生的压力和冲击波在空腔周围形成了环向裂纹和呈放射状的径向裂纹,裂纹彼此交叉、相连,形成裂纹网络。裂纹的产生及方向分布与晶体在各个方向上的劲度系数和化学键有关^[24]。当体缺陷深埋体内(距表面大于 100 μm),则形成体内损伤点(Pinpoint)^[25];当体缺陷位于元件表层(距表面 15~100 μm),延伸到表面的裂纹使材料脱落形成损伤坑,表面脱落使等离子体球压力快速释放而喷发,形成图 3 的空腔,这种空腔与构成体内损伤点(Pinpoint)的空腔有不同之处,体内损伤点的空腔在形成过程中因未经历等离子体喷发,所以内部充满了晶体碎屑^[25];当裂纹恰好延伸到表面,则形成如图 4 所示的表面损伤裂纹,这种出现在表面的损伤裂纹是介于表面损伤和体损伤之间的一个特例;如果体缺陷恰好位于表面或浅表面(深度小于空腔直径),则可能形成如图 7 所示的表面微坑,其损伤阈值可能远低于埋藏更深的其他体缺陷。

平底损伤坑对应的前驱体则比较复杂。图 5(a)对应的前驱体与图中黄色虚线所示的裂纹有关(从小图可见清晰裂纹),其位于损伤坑边沿并延伸至坑外;从图 5(a')中的黄色箭头所指位置可见整齐的坑壁和沿坑壁延伸向体内的裂纹,这种裂纹源自表面加工,裂纹内埋藏物的吸收或裂纹引起的局部光强增强产生的“爆炸”形成了损伤坑。仔细观察图 5(b')会发现损伤坑中心区域(黄色方框内,坑深 25 μm)的坑壁方向(黄色虚线所示)与图 3 中放射状裂纹的方向类似,其前驱体应是埋藏深度小于 25 μm 的位于图中红色圆圈处的体缺陷,“爆炸”产生的材料表面脱落和碎片带走了空腔。图 5(c)所示“贝壳”状损伤形貌,常见于熔石英和晶体的表面损伤^[13,26],晶体表面加工裂纹、裂纹内埋藏的碎屑、表层体缺陷等都可能形成这类损伤坑的前驱体,前驱体物理、化学性质的不对称,及晶体本身的各向异性,导致了损伤坑形状的多样性。

引起图 6 所示表面烧蚀的前驱体主要是表面污染或浅表层缺陷,它们吸收激光能量后在晶体表面和空气中形成等离子体和冲击波,高温等离子体沿表面膨胀对晶体表面进行烧蚀,等离子体向体内扩展则会引起材料体内损伤,冲击波会增大表面烧蚀和体内裂纹的范围。图 6(b)中所标 1、2、3 分别表示中心微坑、烧蚀区和沉积区:中心微坑是浅表层缺陷吸收激光形成等离子体后留下的,没有中心微坑的表面烧蚀的前驱体可能是表面污染,因其附着在元件表面上而不像缺陷嵌入材料内,所以未在材料体内产生损伤;烧蚀区是高温等离子体沿表面膨胀烧蚀后留下的中间低、周围高的缓坡坑,烧蚀区内材料表面的平整度变差,晶体表面被气化和等离子体化后由冲击波带走;沉积区是由冷却后的烧蚀物堆积而成。由于等离子体对 1ω 的吸收截面大于 3ω ,所以表面烧蚀主要出现在 1ω 辐照情况下。

表 1 是上述四种典型表面损伤形貌的主要特征数据。在本论文实验条件下,DKDP 晶体的表面损伤坑的深度在 5~100 μm 范围,损伤坑直径在 30~500 μm 范围,平底损伤坑和带坑底空腔损伤坑是主要的表面损伤形貌,约占总数的 90%;表面损伤裂纹、表面烧蚀及其他损伤形貌约占 10%。上述讨论和分析结果表明:(1)形成 DKDP 晶体表面损伤的前驱体位于元件表面和表面下 100 μm 范围内;(2)引起 DKDP 晶体表面损伤的前驱体主要是位于表层的体缺陷、表面加工裂纹和裂纹内碎屑;(3)损伤前驱体的位置及其在激光辐照下可能形成的损伤形貌如图 9 所示。

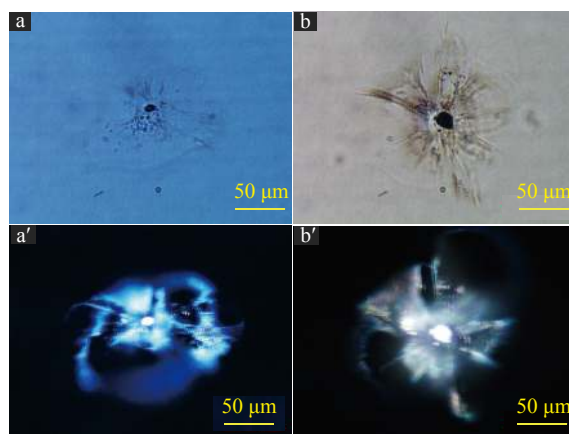


Fig. 8 Damaged cavities and cracks in the bulk

图 8 晶体体内损伤空腔及其周围裂纹

表 1 表面损伤形貌的特征数据

Table 1 Characteristic data of surface damage morphology

	depth of damage crater/ μm	size of damage crater/ μm	probability of occurrence/%	damage precursor
crater with cavity	15~100	50~300	~30	crystal bulk defect
crater with flat bottom	5~50	50~200	~60	surface cracks and surface defect
surface damage crack	20~100	50~200	~5	crystal bulk defect
surface ablation and others	—	30~500	~5	surface contamination and surface defect

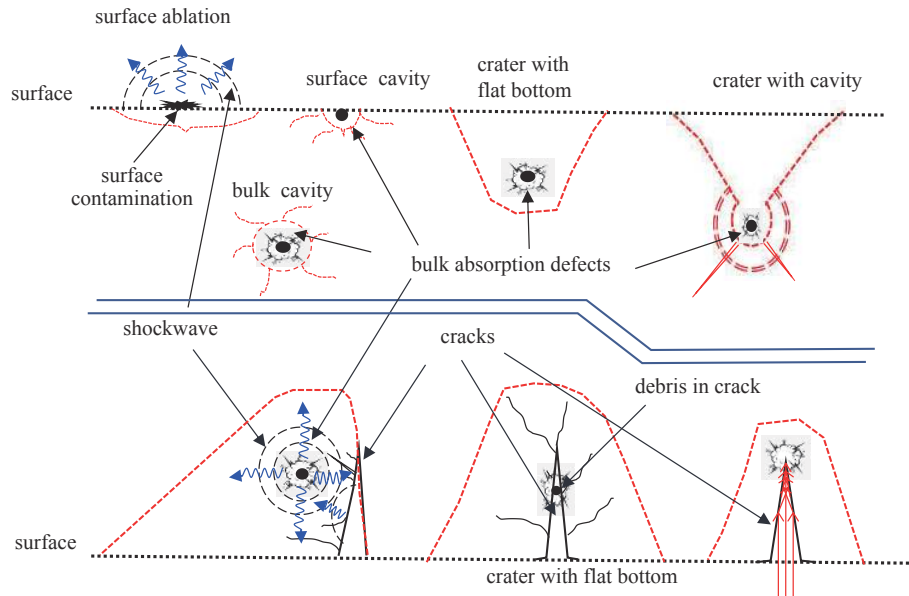


Fig. 9 Typical morphology of surface damages induced by defects

图9 缺陷诱导晶体表面损伤示意图

因体缺陷在晶体中均匀分布,当其位于元件表层特别是浅表层时,其对应的损伤阈值会低于相同体缺陷深埋体内的情况,再加上表面污染、划痕、加工裂纹、残余应力等表面缺陷,表面损伤阈值会进一步降低。所以,对于晶体元件而言,表面损伤仍然是其抗强激光辐照损伤的薄弱环节。

在工程上,为提高装置的负载能力,可以在晶体元件镀膜前,先对元件进行激光辐照预处理,然后在工作通量相当的辐照条件下进行预辐照以提前暴露和消除部分损伤前驱体,从而达到对元件进行筛选的目的。

4 结 论

损伤形貌是损伤前驱体性质和损伤机制的外在表现。通过对比研究和分析 355 nm 和 1064 nm 激光辐照下 DKDP 晶体元件的表面损伤规律,可以得到如下结论:(1)在本文的实验条件下,晶体表面损伤主要有带坑底空腔损伤坑、表面损伤裂纹、平底损伤坑和表面烧蚀四种典型形貌,晶体元件前后表面的损伤阈值和损伤形貌并无明显差异;(2)引起晶体表面损伤的前驱体主要有表面加工裂纹、裂纹内碎屑、划痕、表层体缺陷等表层缺陷和表面污染,作为损伤前驱体的表层缺陷主要在表面下 100 μm 范围内;(3)表层体缺陷会引起表面损伤,根据体缺陷埋藏深度、吸收性质、激光通量水平、以及周围材料的机械特性等因素,体缺陷可能形成上述所有类型的表面损伤形貌;(4)晶体的表面损伤是个复杂的过程,表面损伤形貌和前驱体种类并不一一对应,一个损伤坑的产生,往往是单个缺陷作为前驱体和诱因,多种前驱体和损伤机制共同作用的结果。

参考文献:

- [1] Manes K R, Spaeth M L, Adams J J, et al. Damage mechanisms avoided or managed for NIF large optics[J]. *Fusion Science and Technology*, 2016, 69(1): 146-249.
- [2] 柴向旭, 李富全, 王圣来, 等. 氘含量对DKDP晶体横向受激拉曼散射增益系数的影响[J]. *物理学报*, 2015, 64: 034213. (Chai Xiangxu, Li Fuquan, Wang Shenglai, et al. Influence of deuteration degree on the transverse stimulated Raman scattering gain coefficient of DKDP crystal[J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, 64: 034213)
- [3] Spaeth M L, Manes K R, Kalantar D H, et al. Description of the NIF laser[J]. *Fusion Science and Technology*, 2016, 69(1): 25-145.
- [4] 刘畅, 巨新, 刘宝安, 等. 大口径DKDP元件的辐照损伤分布特性[J]. *强激光与粒子束*, 2021, 33: 111013. (Liu Chang, Ju Xin, Liu Baoan, et al. Irradiation damage distribution characteristics of DKDP in large-aperture high-energy laser[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2021, 33: 111013)
- [5] 赵元安, 邵建达, 刘晓凤, 等. 光学元件的激光损伤问题[J]. *强激光与粒子束*, 2022, 34: 011004. (Zhao Yuanan, Shao Jianda, Liu Xiaofeng, et al. Tracking and understanding laser damage events in optics[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2022, 34: 011004)
- [6] Huang Jin, Wu Zhiqing, Wang Fengrui, et al. Initial damage and damage growth of KDP crystals induced by 355 nm pulse laser[J]. *Crystal Research & Technology*, 2018, 53: 1700269.
- [7] 徐子媛, 王岳亮, 赵元安, 等. 不同脉冲宽度355 nm波长激光诱导DKDP晶体损伤特性[J]. *强激光与粒子束*, 2019, 31: 091004. (Xu Ziyuan, Wang Yueliang, Zhao Yuanan, et al. Laser damage behaviors of DKDP crystals dominated by laser pulse duration[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2019, 31: 091004)
- [8] Wang Yueliang, Zhao Yuanan, Xie Xiaoyi, et al. Laser damage dependence on the size and concentration of precursor defects in KDP crystals: view through

- differently sized filter pores[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(7): 1534-1537.
- [9] Cheng Jian, Wang Janghe, Peng Enhong, et al. Combined modulation of incident laser light by multiple surface scratches and their effects on the laser damage properties of KH_2PO_4 crystal[J]. *Optics Express*, 2020, 28(6): 8764-8782.
- [10] 陈明君, 姜伟, 庞启龙, 等. KDP晶体微纳米加工表层缺陷对其激光损伤阈值的影响[J]. *强激光与粒子束*, 2010, 22(1): 159-164. (Chen Mingjun, Jiang Wei, Pang Qilong, et al. Simulation of micro—nano processing induced surface defects influencing KDP laser damage threshold[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2010, 22(1): 159-164)
- [11] Gao Wei, Ji Jianwei, Wang Chao, et al. Mitigation of subsurface damage in potassium dihydrogen phosphate (KDP) crystals with a novel abrasive-free jet process[J]. *Optical Materials Express*, 2018, 8(9): 2625-2635.
- [12] Yang Hao, Cheng Jian, Chen Mingjun, et al. Optimization of morphological parameters for mitigation pits on rear KDP surface: experiments and numerical modeling[J]. *Optics Express*, 2017, 25(15): 18332-18345.
- [13] Liu Zhichao, Geng Feng, Li Yaguo, et al. Study of morphological feature and mechanism of potassium dihydrogen phosphate surface damage under a 351 nm nanosecond laser[J]. *Applied Optics*, 2018, 57(35): 10334-10341.
- [14] Wang Shengfei, Wang Jian, Xu Qiao, et al. Influences of surface defects on the laser-induced damage performances of KDP crystal[J]. *Applied Optics*, 2018, 57(10): 2638-2646.
- [15] Han Wei, Zhou Lidan, Xiang Yong, et al. Characteristics of laser-induced surface and bulk damage of large-aperture deuterated potassium dihydrogen phosphate at 351 nm[J]. *Chinese Physics Letters*, 2016, 33: 027803.
- [16] Yang Hao, Cheng Jian, Liu Zhichao, et al. Dynamic behavior modeling of laser-induced damage initiated by surface defects on KDP crystals under nanosecond laser irradiation[J]. *Scientific Reports*, 2020, 10: 500.
- [17] Papernov S, Schmid A W. Laser-induced surface damage of optical materials: absorption sources, initiation, growth, and mitigation[C]//Proceedings of SPIE 7132, Laser-Induced Damage in Optical Materials: 2008. 2008: 71321J.
- [18] Wang Shengfei, Wang Jian, Lei Xiangyang, et al. Investigation of the laser-induced surface damage of KDP crystal by explosion simulation[J]. *Optics Express*, 2019, 27(11): 15142-15158.
- [19] 赵元安, 胡国行, 刘晓凤, 等. 激光预处理技术及其应用[J]. *光学精密工程*, 2016, 24(12): 2938-2947. (Zhao Yuanan, Hu Guohang, Liu Xiaofeng, et al. Laser conditioning technology and its applications[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24(12): 2938-2947)
- [20] Li Ting, Zhao Yuanan, Lian Yafei, et al. Optimizing sub-nanosecond laser conditioning of DKDP crystals by varying the temporal shape of the pulse[J]. *Optics Express*, 2021, 29(22): 35993-36004.
- [21] 刘志超, 许乔, 雷向阳, 等. 大口径氘化磷酸二氢钾晶体离线亚纳秒激光预处理技术[J]. *物理学报*, 2021, 70: 074208. (Liu Zhichao, Xu Qiao, Lei Xiangyang, et al. Off-line sub-nanosecond laser conditioning on large aperture deuterated potassium dihydrogen phosphate crystal[J]. *Acta Physica Sinica*, 2021, 70: 074208)
- [22] Sun Wei, Qi Hongji, Fang Zhou, et al. 1064 nm nanosecond laser induced concentric rings and periodic ripples structures at the exit surface of fused silica[J]. *Applied Surface Science*, 2014, 309: 79-84.
- [23] Chambonneau M, Rullier J L, Grua P, et al. Wavelength dependence of the mechanisms governing the formation of nanosecond laser-induced damage in fused silica[J]. *Optics Express*, 2018, 26(17): 21819-21830.
- [24] 胡国行. KDP/DKDP晶体和熔石英激光损伤及抑制技术研究[D]. 上海: 中国科学院研究生院, 2011: 48-76. (Hu Guoxing. Laser induced damage and suppression techniques for KDP/DKDP crystal and fused silica [D]. Beijing: Chinese Academy of Sciences, 2011)
- [25] Carr C W, Feit M D, Johnson M A, et al. Complex morphology of laser-induced bulk damage in $\text{K}_2\text{H}_{(2-x)}\text{D}_x\text{PO}_4$ crystals[J]. *Applied Physics Letters*, 2006, 89: 131901.
- [26] Wang Ke, Ma Bin, Han Jiaqi, et al. Morphological and damage growth characteristics of shell-type damage of fused silica optics induced by ultraviolet laser pulses[J]. *Applied Optics*, 2019, 58(32): 8882-8888.