

1064 nm 激光和 355 nm 激光同时辐照 DKDP 晶体的耦合预处理效应

吴金明^{1,2,4}, 赵元安^{2,4,5*}, 汪琳^{1**}, 彭小聪^{2,3,4}, 杨留江^{2,4}, 单翀⁶, 邵建达^{2,4***}

¹上海大学材料科学与工程学院, 上海 200444;

²中国科学院上海光学精密机械研究所薄膜光学实验室, 上海 201800;

³中国科学院大学材料与光电研究中心, 北京 100049;

⁴中国科学院强激光材料重点实验室, 上海 201800;

⁵中国科学院长春光学精密机械与物理研究所应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033;

⁶中国工程物理研究院上海激光等离子体研究所, 上海 201800

摘要 为了研究 DKDP 晶体在惯性约束核聚变(ICF)装置应用中的多波长激光诱导损伤特性,建立了 1064 nm 激光和 355 nm 激光同时辐照 DKDP 晶体的损伤测试装置,分析了不同激光能量密度组合下的损伤针点形貌、密度、尺寸和损伤概率。结果表明,当 355 nm 激光以 R-on-1 方式辐照样品,并加入不同能量密度的 1064 nm 激光时,随着 1064 nm 激光能量密度的升高,测试样品的抗激光损伤性能得到改善,损伤针点形貌逐渐与 1064 nm 激光单独作用时的损伤形貌类似,损伤针点密度减小,损伤针点尺寸增大,整体上表现出耦合预处理效应。

关键词 激光光学; 晶体; 预处理效应; 多波长激光; 损伤缺陷

中图分类号 O731

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.0501003

Coupling Conditioning Effect of DKDP Crystals Under Simultaneous Irradiation by 1064 nm laser and 355 nm Laser

Wu Jinming^{1,2,4}, Zhao Yuan'an^{2,4,5*}, Wang Lin^{1**}, Peng Xiacong^{2,3,4},
Yang Liujiang^{2,4}, Shan Chong⁶, Shao Jianda^{2,4***}

¹School of Materials Science and Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China;

²Laboratory of Thin Film Optics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Shanghai 201800, China;

³Center of Materials Science and Optoelectronics Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

⁴Key Laboratory of Materials for High Power Laser, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

⁵State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China;

⁶Shanghai Institute of Laser Plasma, China Academy of Engineering Physics, Shanghai 201800, China

Abstract To study the characteristics of multi-wavelength laser-induced damages in DKDP crystals used in the inertial confinement fusion (ICF) device, a damage test facility is established, in which the DKDP crystals are under the simultaneous irradiation of 1064 nm and 355 nm lasers. The damage pinpoint morphology, density, size, and damage probability under exposure by a combination of different laser fluences are compared and analyzed. When irradiating a sample with 355-nm laser pulses in R-on-1 tests, 1064-nm laser pulses with different fluences are added. The results show that as the 1064-nm laser fluence increases, the laser damage resistance of the sample increases, the damage pinpoint morphology tends to be similar with that when the sample is irradiated by the 1064 nm laser alone, the damage pinpoint density decreases, and the damage pinpoint size increases. As a whole,

收稿日期: 2018-12-29; 修回日期: 2019-01-17; 录用日期: 2019-01-28

基金项目: 国家自然科学基金(11874369, U1831211)、中科院战略性先导科技专项(XDB1603)

* E-mail: yazhao@siom.ac.cn; ** E-mail: wanglinn@shu.edu.cn; *** E-mail: jdsiao@siom.ac.cn

the coupling conditioning effect is clearly exhibited.

Key words laser optics; crystals; conditioning effect; multi-wavelength laser; damage defects

OCIS codes 140.3330; 160.3380; 290.5820

1 引 言

磷酸二氢钾(KDP)和磷酸二氘钾(DKDP)晶体是一类性能优良的光学材料,具有较大的非线性光学系数,较宽的透光波段,易于实现相位匹配,易于生长出优质大尺寸单晶体,生长速度快等优势,常被用作惯性约束核聚变(ICF)高功率激光器中的电光开关元件和频率转换器件^[1]。但这类晶体所存在的激光诱导损伤问题严重影响其光学性能,同时增大了光束对比度以及下游光学元器件损伤的可能性^[2]。目前,KDP/DKDP晶体的纳秒激光诱导损伤源主要是材料在生长、加工以及后续处理过程引入的各种类型的缺陷,带有随机性^[3-5]。

在激光的频率转换过程中,波长为1064 nm的激光首先通过Ⅰ类KDP晶体部分倍频为532 nm激光,532 nm激光与剩余1064 nm激光通过Ⅱ类DKDP晶体混频为355 nm激光,因此,晶体中存在多个波长激光同时辐照的情况^[1]。针对这种情况,Reyné等^[6]发现1064 nm激光以固定能量密度辐照KDP晶体时,材料的损伤概率会随着532 nm倍频激光能量密度的增大而升高。DeMange等^[7-8]发现532 nm和355 nm激光或1064 nm和355 nm激光同时辐照DKDP晶体时,损伤针点密度都会随激光能量密度升高而增大。而且532 nm和355 nm激光或1064 nm和355 nm激光同时辐照DKDP或KDP晶体时的损伤针点密度明显大于双波长激光作用时间存在延迟时的损伤针点密度^[7,9]。Carr等^[10]发现波长分别为1064、532、355 nm的激光同时作用于DKDP晶体时,损伤针点的尺寸随不同波长激光的总能量密度增加而变大,损伤针点密度在输入激光能量密度恒定的情况下随混频转换效率的升高而增大。这些研究结果都表明波长分别为1064、532、355 nm的激光混合辐照KDP/DKDP晶体时,材料损伤会加重^[6-11]。

但355 nm和1064 nm激光共同辐照DKDP晶体时,材料的损伤被抑制,在这个过程中存在一种耦合预处理效应,它是一种新现象。本实验的双波长激光耦合预处理效应也不同于Exarhos等^[12-14]仅采用单波长激光的预处理效应,它是一种新的且更好的激光预处理手段。本实验首先建立了两个不同波

长激光同时辐照DKDP晶体的损伤测试平台,以损伤针点形貌、密度、尺寸和损伤概率为评价指标。当355 nm激光以R-on-1方式作用于样品,并加入不同能量密度(0、12.3、29.4 J/cm²)的1064 nm激光时,随着1064 nm激光能量密度逐渐升高,测试样品的抗激光损伤性能逐渐改善,其损伤针点形貌逐渐趋向于1064 nm激光单独作用时的损伤针点形貌,损伤针点密度逐渐降低,损伤针点尺寸逐渐增大。本实验结果可为通过多波长激光预处理KDP/DKDP晶体来提高材料的抗激光损伤性能的研究提供参考。

2 实验测量方法

2.1 实验装置

激光损伤测试装置如图1所示,光源采用Q-开关Nd:YAG激光器发出的1064 nm基频红外光(1ω)和355 nm三倍频紫外光(3ω),其激光脉宽分别约为9.2 ns和7.8 ns,工作模式为TEM₀₀,重复频率为10 Hz。分别在不同光路上对两个波长的激光参数进行调节和控制,其中激光能量密度由半波片和偏振片组成的能量衰减系统来调节,激光偏振方向由半波片($\lambda/2$, λ 为波长)调节。实验中所用激光偏振方向参照DKDP晶体实际混频过程中两波长的偏振方向,即所选用的激光相对于Ⅱ类三倍频DKDP晶体样品都为非寻常光(e光)^[1]。两个波长的激光单独辐照或共同辐照由机械快门手动控制或联动控制实现。两路激光的时间延迟由延迟模块调节1064 nm激光的光程来实现,由延迟模块后的光电管和示波器组成的探测系统进行反馈调节。两束激光都通过长焦距(6000 mm)透镜聚焦于样品体内,光束焦深远大于样品厚度10 mm,并且两束光的夹角小于1°,从而确保样品中两个波长的脉冲激光在空间和时间方面保持重叠。激光能量、光斑面积、脉宽分别由能量计、光束质量分析仪、示波器测量和记录,其中1064 nm激光和355 nm激光的有效光斑面积分别约为1.0 mm²和0.3 mm²。低能量的532 nm激光用于准直以及照明样品靶点损伤区域,损伤过程由电荷耦合器件(CCD)从侧面实时监控,损伤形貌的分辨精度为3.7 μ m。

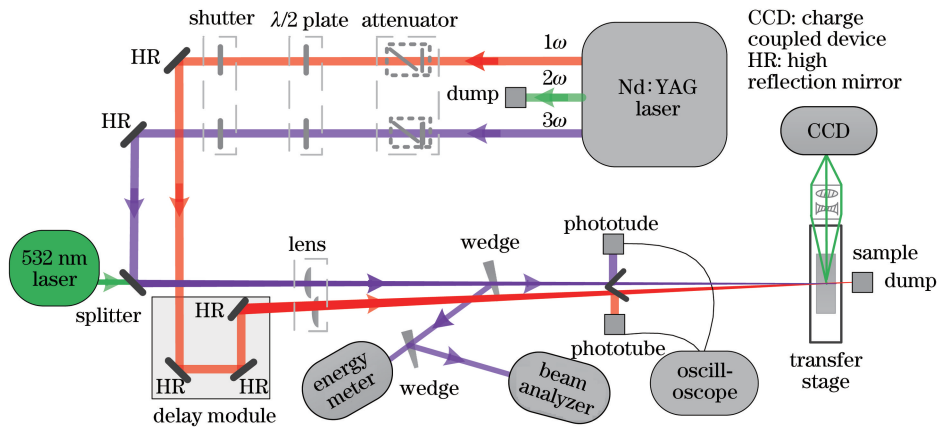


图1 激光损伤测试装置
Fig. 1 Laser damage test facility

2.2 实验样品和测量过程

实验样品为Ⅱ类三倍频 DKDP 晶体,采用传统生长法,氧化率为 70%,尺寸为 45 mm×45 mm×10 mm,表面采用单点金刚石飞切方式进行抛光。整个样品分为 4 个区域,分别由 1064 nm 激光单独辐照、355 nm 激光单独辐照、355 nm 激光和能量密度为 12.3 J/cm² 的 1064 nm 激光同时辐照、355 nm 激光和能量密度为 29.4 J/cm² 的 1064 nm 激光同时辐照。实验过程对样品采用 R-on-1 测试方法^[15],即对样品同一靶点进行激光能量密度不断升高的脉冲辐照,其中 355 nm 激光和 1064 nm 激光单独作用时,起始能量密度都为 0 J/cm²,能量密度梯度为 1.7 J/cm²,最终能量密度分别为 (30.9±2.9) J/cm² 和 (105.3±12.9) J/cm²;而两波长激光同时作用时,1064 nm 激光的能量密度固定为 12.3 J/cm² 或 29.4 J/cm²,355 nm 激光的能量密度变化跟其单独作用时类似,只是其最终能量密度为 (34.1±3.7) J/cm²,这样可以组合成波长成分不同且能量密度不断升高的脉冲激光。每个区域约测试 50 个靶点,可以得到 4 条损伤概率曲线。同时,在每个靶点的 R-on-1 测试结束时通过 CCD 抓拍损伤针点的散射图像,并统计出损伤针点的平均密度和平均直径。

3 实验结果

3.1 损伤概率

实验获得的 R-on-1 激光损伤概率曲线如图 2 所示。1064 nm 激光和 355 nm 激光单独作用时的激光诱导损伤阈值 (LIDT) 分别为 38.7 J/cm² 和 11.7 J/cm²,前者是后者的 3.3 倍,表明短波长激光对 DKDP 晶体材料造成的损伤更严重^[9],即短波长

激光更容易诱导缺陷损伤。同时,1064 nm 激光单独作用时的损伤概率曲线斜率小于 355 nm 激光单独作用时的损伤概率曲线斜率,根据 Krol 模型^[16],即损伤概率曲线的形状和斜率与损伤缺陷的阈值和密度的函数关系,这块样品中 355 nm 激光所对应的损伤缺陷密度应远大于 1064 nm 激光所对应的损伤缺陷密度。当低于损伤阈值能量密度 (12.3 J/cm² 和 29.4 J/cm²) 的 1064 nm 激光和 355 nm 激光同时辐照样时,355 nm 激光的 LIDT 没有发生变化,但随着 1064 nm 激光的加入,355 nm 激光的损伤概率曲线的斜率逐渐减小,说明增加 1064 nm 激光能量密度能减少样品的损伤缺陷密度^[16],同时测试样品的抗激光损伤性能随 1064 nm 激光能量密度升高而得到改善,有预处理效果。1064 nm 激光和 355 nm 激光的能量密度越高,预处理效应越明显,说明两个波长激光之间有相互促进作用,整体上表现出耦合预处理效果。相比于 355 nm 激光单独作用时的损伤概率随能量密度的变化关系,355 nm 激光和 1064 nm 激光同时作用时的损伤响应机制发生了变化,这应该跟它们的脉宽有关,尽管它们的脉冲峰值重合,但是存在大脉宽的 1064 nm 激光的少部分能量提前接触损伤缺陷。

3.2 损伤针点形貌

为了验证损伤概率的变化趋势,利用损伤针点的散射图像观测损伤针点形貌,结果如图 3 所示。1064 nm 激光和 355 nm 激光单独作用时的能量密度分别为 105.3 J/cm² 和 30.9 J/cm²。其中 1064 nm 激光单独作用时的损伤针点形貌是一些孤立的、损伤面积大的、伴有裂纹或明显光晕的损伤针点;而 355 nm 激光单独作用时的损伤针点形貌是一些紧密相邻的,或少数串联的、损伤面积小的、没

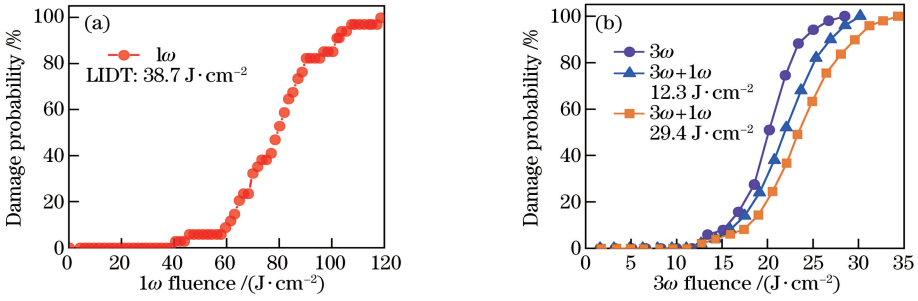


图 2 R-on-1 激光损伤概率曲线。(a) 1ω ; (b) 3ω 和不同定值能量密度的 1ω

Fig. 2 R-on-1 laser damage probability curves. (a) 1ω ; (b) 3ω and 1ω with different fixed fluences

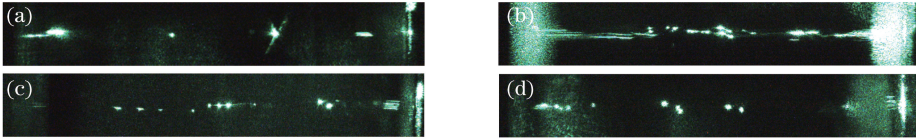


图 3 损伤针点的典型散射图像(晶体厚度为 10 mm)。(a)能量密度为 105.3 J/cm^2 的 1ω ; (b)能量密度为 30.9 J/cm^2 的 3ω ; (c)能量密度为 34.1 J/cm^2 的 3ω 和能量密度为 12.3 J/cm^2 的 1ω ; (d)能量密度为 34.1 J/cm^2 的 3ω 和能量密度为 29.4 J/cm^2 的 1ω

Fig. 3 Typical scatter images of damage pinpoint (crystal thickness of 10 mm). (a) 1ω at energy density of 105.3 J/cm^2 ; (b) 3ω at energy density of 30.9 J/cm^2 ; (c) 3ω at energy density of 34.1 J/cm^2 and 1ω at energy density of 12.3 J/cm^2 ; (d) 3ω at energy density of 34.1 J/cm^2 and 1ω at energy density of 29.4 J/cm^2

有裂纹或明显光晕的损伤针点。这跟光学显微镜下的损伤显微形貌类似, 1064 nm 激光的损伤显微形貌由中心点、周围微变化区域和定向裂纹组成, 而 355 nm 激光的损伤显微形貌主要由中心点和周围微变化区域组成, 很少有定向裂纹^[17-18], 这表明两波长激光所对应的损伤缺陷有所不同。当 355 nm 激光在 R-on-1 方式下加入能量密度为 12.3 J/cm^2 或 29.4 J/cm^2 的 1064 nm 激光时, 损伤针点形貌偏向于 1064 nm 激光单独作用时的损伤形貌, 损伤针点间距增大, 尺寸较小的损伤针点数量减少, 这应该是两个波长激光的耦合预处理效应所产生的结果。

3.3 损伤针点密度和尺寸

本实验还分析了损伤针点的变化趋势。损伤针点的平均密度 d 和平均直径 D 可表示为

$$d = \frac{\sum_{i=1}^n N_i}{nds}, \quad (1)$$

$$D = 2 \sqrt{(n\pi)^{-1} \sum_{i=1}^n \frac{A_i}{N_i}}, \quad (2)$$

式中: $n=50$, 为靶点数量; $d=10 \text{ mm}$, 为晶体厚度; s 为光斑面积(其中双波长激光的光斑面积仅按 355 nm 激光光斑面积计算, 因为双波长激光中 1064 nm 激光的能量密度低于其单独作用时的损伤阈值, 激光诱导损伤主要发生在 355 nm 激光的小光斑内); N_i 为每个靶点内的损伤针点总数量; A_i 为损伤针点总面积。 N_i 和 A_i 可以从损伤针点的散射图像中获取。不同组合下的损伤针点的平均密度和平均直径如图 4 所示。

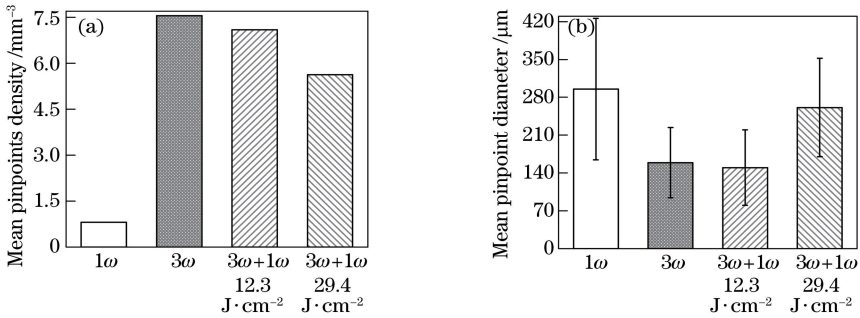


图 4 不同组合下的损伤针点统计数据。(a)平均密度;(b)平均直径(线段代表统计标准差)

Fig. 4 Damage pinpoint statistics under different combinations. (a) Average density; (b) average diameter (line segment represents statistical standard deviation)

当 1064 nm 激光和 355 nm 激光分别单独辐照样品时, 355 nm 激光的损伤针点平均密度远大于 1064 nm 激光的损伤针点平均密度; 当 355 nm 激光和 1064 nm 激光同时辐照样品时, 损伤针点平均密度随 1064 nm 激光能量密度的升高而逐渐降低, 这些跟损伤概率预测结果一致。

当 1064 nm 激光和 355 nm 激光分别单独辐照样品时, 1064 nm 激光的损伤针点平均直径比 355 nm 激光的大 1 倍左右。当 355 nm 激光和能量密度为 12.3 J/cm^2 的 1064 nm 激光同时辐照样品时, 其损伤针点平均直径与 355 nm 激光单独辐照时的平均直径相近; 但 355 nm 激光单独作用时, 存在少数细小损伤针点的串联, 从而增大了损伤针点的平均直径, 也就是说, 当 355 nm 激光和能量密度为 12.3 J/cm^2 的 1064 nm 激光同时辐照样品时, 其损伤针点的平均直径比 355 nm 激光单独辐照时的略大。当 355 nm 激光和能量密度为 29.4 J/cm^2 的 1064 nm 激光同时辐照样品时, 其损伤针点的平均直径趋近但未超过 1064 nm 激光单独辐照时的结果, 这说明 1064 nm 激光的能量密度增加时, 所减少的损伤针点是一些尺寸较小的损伤缺陷, 同时说明损伤针点的尺寸随着 1064 nm 激光能量密度的增加而增大。

4 实验分析

1064 nm 激光和 355 nm 激光的耦合预处理效应可以从 R-on-1 测试过程中的损伤概率曲线和测试终态的损伤针点形貌、密度、尺寸的测量结果中得到验证, 是一种新的现象。假设在激光辐照范围内存在一个球形前驱体缺陷, 吸收单个波长的激光能量, 会引起温度变化, 若温度达到临界值, 会导致晶体材料出现损伤^[19-20]。损伤缺陷所吸收的激光能量为 $Q = \alpha I \pi a^2$, 其中 α 为吸收率, I 为激光的能量密度, a 为损伤缺陷半径。当损伤缺陷半径 a 小于入射激光波长 λ 时, 吸收率为

$$\alpha \approx \frac{12na}{\lambda} \text{Im} \frac{n^2}{\epsilon + 2n^2}, \quad (3)$$

式中: n 为损伤缺陷的折射率; m 为损伤缺陷的消光系数; ϵ 为损伤缺陷的介电常数。当损伤缺陷的半径 a 接近入射激光波长 λ 时, 可以根据米氏吸收理论计算吸收率 α 和损伤缺陷半径 a 的关系。实验样品在各种波长激光辐照下的损伤阈值都比较高, 说明样品质量比较好, 损伤缺陷的半径 a 偏小^[21]。由 (3) 式可知, 激光的波长 λ 不同时, 损伤缺陷的敏感

半径也不同, 这会影响预处理的效果和损伤的产生。根据损伤概率曲线和损伤针点的散射图像可知, 1064 nm 激光单独作用时所对应的损伤缺陷尺寸比较大, 但损伤缺陷密度较低, 而 355 nm 激光单独作用时所对应的损伤缺陷刚好相反, 两者有明显的损伤波长效应, 表明 1064 nm 激光和 355 nm 激光分别属于两类损伤缺陷^[22], 对应于不同的敏感损伤缺陷。当 355 nm 激光以伴有激光预处理效果的 R-on-1 方式辐照样品^[12-14], 并加入不同的低于损伤阈值能量密度 (12.3 J/cm^2 和 29.4 J/cm^2) 的 1064 nm 激光时, 损伤响应机制发生变化, 这应该跟它们的脉宽有关, 尽管它们脉冲峰值相同, 但是存在大脉宽的 1064 nm 激光的少部分能量提前接触损伤缺陷; 同时, 光斑范围内激活的敏感损伤缺陷类型及其数量会变化, 在 R-on-1 测试过程的损伤发生前, 波长成分不同且能量密度不断升高的脉冲激光会对材料逐渐改性, 减少一些细小的、容易预处理的损伤缺陷, 整体上表现出耦合预处理效应。

5 结 论

研究了 1064 nm 激光和 355 nm 激光同时辐照 DKDP 晶体的损伤特性, 以损伤针点的形貌、密度、尺寸和损伤概率为评价指标。研究结果表明: 当 1064 nm 激光和 355 nm 激光以 R-on-1 方式单独辐照样品时, 测试样品在损伤概率或损伤针点方面有不同的损伤响应, 表现出明显的波长效应; 当 355 nm 激光以 R-on-1 方式辐照样品, 并加入不同能量密度 ($0, 12.3, 29.4 \text{ J/cm}^2$) 的 1064 nm 激光时, 随着 1064 nm 激光能量密度的逐渐升高, 测试样品的抗激光损伤性能逐渐改善, 损伤针点形貌逐渐趋向于 1064 nm 激光单独作用时的损伤形貌, 损伤针点的密度逐渐降低, 损伤针点的尺寸逐渐增大, 整体上表现出耦合预处理效应。实验结果可为通过多波长激光预处理 KDP/DKDP 晶体来提高材料的抗激光损伤性能的研究提供参考。

参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] 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.

- [3] Xie X Y, Zhu M D, Wang B, *et al.* Performance of rapidly grown KDP crystals irradiated by gamma ray [J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(10): 1003004.
 谢晓义, 朱茂东, 王斌, 等. γ 射线辐照快速生长 KDP 晶体的性能 [J]. 中国激光, 2018, 45(10): 1003004.
- [4] Wang S F, Xu Q, Wang J, *et al.* Methods for surface defect suppression in fly-cutting fabrication of KDP crystals[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(11): 1116001.
 汪圣飞, 许乔, 王健, 等. KDP 晶体飞切加工表面缺陷的抑制方法 [J]. 光学学报, 2018, 38(11): 1116001.
- [5] Ran Y T, Huang H B, Yin J, *et al.* Study on defect depth of surface of KDP crystals fabricated by single point diamond turning [J]. Acta Photonica Sinica, 2017, 46(5): 0524001.
 冉钰庭, 黄宏彪, 尹进, 等. 单点金刚石飞切 KDP 晶体表面缺陷深度的研究 [J]. 光子学报, 2017, 46(5): 0524001.
- [6] Reyné S, Duchateau G, Natoli J Y, *et al.* Laser-induced damage of KDP crystals by 1 ω nanosecond pulses: influence of crystal orientation [J]. Optics Express, 2009, 17(24): 21652-21665.
- [7] DeMange P, Negres R A, Rubenchik A M, *et al.* The energy coupling efficiency of multiwavelength laser pulses to damage initiating defects in deuterated KH_2PO_4 nonlinear crystals [J]. Journal of Applied Physics, 2008, 103(8): 083122.
- [8] DeMange P, Negres R A, Rubenchik A M, *et al.* Understanding and predicting the damage performance of $\text{KD}_x\text{H}_{2-x}\text{PO}_4$ crystals under simultaneous exposure to 532- and 355-nm pulses[J]. Applied Physics Letters, 2006, 89(18): 181922.
- [9] Reyné S, Loiseau M, Duchateau G, *et al.* Toward a better understanding of multi-wavelength effects on KDP crystals[J]. Proceedings of SPIE, 2009, 7361: 73610Z.
- [10] Carr C W, Auerbach J M. Effect of multiple wavelengths on laser-induced damage in $\text{KH}_{2-x}\text{D}_x\text{PO}_4$ crystals[J]. Optics Letters, 2006, 31(5): 595-597.
- [11] Reyné S, Duchateau G, Natoli J Y, *et al.* Pump-pump experiment in KH_2PO_4 crystals: coupling two different wavelengths to identify the laser-induced damage mechanisms in the nanosecond regime [J]. Applied Physics Letters, 2010, 96(12): 121102.
- [12] Exarhos G J, Adams J J, Guenther A H, *et al.* Wavelength and pulse length dependence of laser conditioning and bulk damage in doubler-cut KH_2PO_4 [J]. Proceedings of SPIE, 2005, 5991: 59911R.
- [13] Adams J J, Jarboe J A, Carr C W, *et al.* Results of sub-nanosecond laser-conditioning of KD_2PO_4 crystals [J]. Proceedings of SPIE, 2006, 6403: 64031M.
- [14] Exarhos G J, Adams J J, Guenther A H, *et al.* Pulse length dependence of laser conditioning and bulk damage in KD_2PO_4 [J]. Proceedings of SPIE, 2004, 5647: 265-278.
- [15] Hu G H, Zhao Y A, Sun S T, *et al.* One-on-one and R-on-one tests on KDP and DKDP crystals with different orientations [J]. Chinese Physics Letters, 2009, 26(8): 087801.
- [16] Krol H, Gallais L, Grèzes-Besset C, *et al.* Investigation of nanoprecursors threshold distribution in laser-damage testing[J]. Optics Communications, 2005, 256(1/2/3): 184-189.
- [17] Hu G H, Zhao Y A, Li D W, *et al.* Wavelength dependence of laser-induced bulk damage morphology in KDP crystal: determination of the damage formation mechanism [J]. Chinese Physics Letters, 2012, 29(3): 037801.
- [18] Reyné S, Duchateau G, Hallo L, *et al.* Multi-wavelength study of nanosecond laser-induced bulk damage morphology in KDP crystals [J]. Applied Physics A, 2015, 119(4): 1317-1326.
- [19] Feit M D, Rubenchik A M. Implications of nanoabsorber initiators for damage probability curves, pulse length scaling, and laser conditioning [J]. Proceedings of SPIE, 2004, 5273: 74-83.
- [20] Zhou M, Zhao Y A, Li D W, *et al.* Laser damage of optical film with the combined irradiation of 1064 nm and 532 nm pulse [J]. Chinese Journal of Lasers, 2009, 36(11): 3050-3054.
 周明, 赵元安, 李大伟, 等. 1064 nm 和 532 nm 激光共同辐照薄膜的损伤 [J]. 中国激光, 2009, 36(11): 3050-3054.
- [21] Wang Y, Zhao Y, Xie X, *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.
- [22] Negres R A. Differentiation of defect populations responsible for bulk laser-induced damage in potassium dihydrogen phosphate crystals [J]. Optical Engineering, 2006, 45(10): 104205.