

做科研，非一朝一夕

——买器材，应速战速决

Newport数千种优质产品当日发货，
更多惊喜尽在PhotonSpeed™光速购！



 **mks** | Newport™

CaF₂ 晶体的不同晶面在 355 nm 脉冲激光辐照下的损伤特性

徐子媛^{1,2}, 彭小聪^{1,2,3}, 赵元安^{1,2,3,4*}, 李大伟^{1,2,3}, 刘荣荣⁵, 苏良碧^{5**}, 邵建达^{1,2,3}

¹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;

²中国科学院强激光材料重点实验室, 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;

⁵中国科学院上海硅酸盐研究所, 上海 201899

摘要 研究了氟化钙(CaF₂)晶体不同晶面在 355 nm 脉冲激光辐照下的损伤特性。在 7.8 ns 脉冲激光辐照下, 测量(100)、(110)和(111)三种不同晶面样品的损伤阈值和损伤点形貌, 并基于表面热透镜技术测量样品表面的光热弱吸收。实验结果表明:(111)晶面 CaF₂ 晶体样品的光热吸收最高, 激光损伤阈值最低, 损伤形貌表现为熔融坑, 并伴随有片层状剥离, 说明了(111)面在 355 nm 激光作用下易解理;(100)和(110)面晶体的损伤形貌同样为熔融坑, 但损伤阈值及光热弱吸收与晶面无明确的关联。

关键词 材料; 氟化钙(CaF₂); 激光损伤; 损伤阈值; 损伤形貌; 光热吸收

中图分类号 O731

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.1103001

Damage Characteristics of CaF₂ Crystals with Different Planes Irradiated by 355-nm Pulse Laser

Xu Ziyuan^{1,2}, Peng Xiaocong^{1,2,3}, Zhao Yuanan^{1,2,3,4*}, Li Dawei^{1,2,3},
Liu Rongrong⁵, Su Liangbi^{5**}, Shao Jianda^{1,2,3}

¹Laboratory of Thin Film Optics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

²Key Laboratory of Materials for High Power Laser, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

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

⁴State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China;

⁵Shanghai Institute of Ceramics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201899, China

Abstract The laser damage characteristics of calcium fluoride (CaF₂) crystals with various lattice planes irradiated by 355-nm pulse laser are investigated. Further, the damage thresholds and damage morphologies of three different lattice planes, *i.e.*, (100), (110), and (111), are measured under a 7.8-ns pulse laser irradiation. In addition, the photothermal absorption is evaluated by using the surface thermal lensing technique. The (111) CaF₂ crystal exhibits the highest photothermal absorption and lowest laser damage threshold. The (111) damage morphology comprises a melt pit, which is accompanied by lamellar peeling, indicating that this plane is easily cleaved by the 355-nm laser. The (100) and (110) damage morphologies also comprise a melt pit; however, the damage threshold and photothermal absorption have no clear correlation with the two lattice planes.

收稿日期: 2019-04-22; 修回日期: 2019-05-27; 录用日期: 2019-06-25

基金项目: 国家自然科学基金(1913031G00)

* E-mail: yazhao@siom.ac.cn; ** E-mail: suliangbi@mail.sic.ac.cn

Key words materials; calcium fluoride (CaF_2); laser damage; damage threshold; damage morphology; photothermal absorption

OCIS codes 160.3220; 160.4760; 140.3538

1 引言

氟化钙(CaF_2)是一种传统的宽带隙晶体材料,具有传输光谱范围宽($0.125\sim 10\ \mu\text{m}$)、折射率均匀度高、相对色散大、应力双折射低和损伤阈值高等优点,已在光电信息领域广泛应用^[1-2]。特别地,在真空紫外波段, CaF_2 晶体优异的透过性能和抗激光损伤能力更是其他材料无法比拟的,从而使其成为准分子激光光刻系统中重要的光学材料^[3-4]。现阶段,大口径熔石英元件在 355 nm 波长下的激光损伤是制约惯性约束核聚变(ICF)激光驱动器负载能力提升的主要因素之一^[5]。相比于熔石英, CaF_2 晶体在紫外波段具有更高的激光损伤阈值,是更理想的 ICF 终端光学组件,但大尺寸 CaF_2 晶体的生长却存在较大难度。近年来,大尺寸 CaF_2 晶体生长技术的突破性进展使其在 ICF 激光驱动器中的应用成为可能。沈永宏等^[6]采用坩埚下降法生长出直径为 210 mm 的 CaF_2 多晶体;苏良碧等^[7]采用导向温度梯度法获得了直径为 220 mm 的高质量 CaF_2 晶体;张钦辉等^[8]基于改进的坩埚下降法成功生长出直径达 370 mm 的 CaF_2 晶体。

研究人员在 248, 193, 157 nm 等光刻波段对 CaF_2 晶体的激光损伤特性进行了研究;Gogoll 等^[9]研究了 CaF_2 晶体的(111)晶面在 248 nm 脉冲激光作用下的损伤特性;Azumi 等^[10]测量了不同晶轴取向的 CaF_2 晶体在脉宽为 20 ns、波长为 193 nm 的激光作用下的损伤特性,证明了不同的晶轴取向会造成不同的损伤阈值。然而,作为一种潜在的 ICF 激光驱动器中的负载元件, CaF_2 晶体在此应用场景下的激光损伤特性尚未得到充分研究。因此,研究 CaF_2 晶体在 355 nm 脉冲激光辐照下的损伤特性,特别是晶体结构和晶面对其激光破坏特性的影响,具有重要的现实意义。

本文对 CaF_2 晶体的(100)、(110)和(111)三种不同晶面进行了激光损伤及光热吸收实验,获得了晶面与光热吸收、损伤特性之间的关系,并对其中的关系进行了阐释,然后以此为基础,提出了 CaF_2 晶体在 355 nm 波长下的使用建议。

2 实验方法

2.1 实验样品

用 X 射线衍射法定向制备含有(111)晶面、

(100)晶面、(110)晶面的三块样品,立方体的 6 个面采用手工抛光。整个系统封闭后抽真空,在气压降到 10^{-3} Pa 后运行温控程序,操作过程在压强为 11.1 kPa 的氩气氛围下进行。在升温过程中,为了充分去除原料中的水蒸气,在 $300\sim 400\ ^\circ\text{C}$ 下保温 2~3 h,并在 $800\sim 900\ ^\circ\text{C}$ 放慢升温速率,以利于原料中作为清除剂的氟化铅(PbF_2)与氧杂质反应,最后升温到 CaF_2 熔点使原料熔化。降温过程中为维持温度场的恒定,以 $1\ ^\circ\text{C}/\text{h}$ 的速率^[11-12]进行降温。

实验样品按照编号分成了如下两类:

1[#]~3[#]样品:用 X 射线衍射法定向切割制备 $15\ \text{mm}\times 15\ \text{mm}\times 15\ \text{mm}$ 的三块立方体样品,使每块样品中分别含有(111)、(100)和(110)晶面,所有表面均采用手工抛光。每块样品选取三个正交面进行光热吸收和激光损伤测试,对每个样品的三个正交面分别进行命名。1[#]样品 Face 1 为(110)面,简称为 1[#]-(110),其余两面分别称为 1[#]-Face 2 和 1[#]-Face 3;2[#]样品 Face 3 为(100)面,简称为 2[#]-(100),其余两面分别称为 2[#]-Face 1 和 2[#]-Face 2;3[#]样品 Face 2 为(111)面,简称为 3[#]-(111),其余两面分别称为 3[#]-Face 1 和 3[#]-Face 3。

4[#]~8[#]样品:用 X 射线衍射法定向切割制备直径为 30 mm、厚度为 3 mm 的(111)晶面样品,共 5 块,采用手工抛光表面。

2.2 激光损伤测试

利用 355 nm 波长的 7.8 ns 脉冲激光测量不同晶面 CaF_2 晶体的激光损伤阈值,实验装置如图 1 所示。光源采用 Q-开关 Nd:YAG 激光器,输出激光波长为 1064 nm,脉宽为 12 ns,工作模式为单横模,重复频率为 10 Hz。通过三硼酸锂(LBO)倍频晶体和偏硼酸钡(BBO)混频晶体获得三倍频 355 nm 激光输出,脉冲宽度为 7.8 ns。通过由半波片和偏振片组成的能量衰减系统调节样品表面的激光能量密度,激光经过焦距为 5000 mm 的透镜和楔形片后辐照样品表面,光斑面积为 $0.825\ \text{mm}^2$ 。楔形片分出的光束用于监测激光能量和光斑面积,损伤诊断系统使用 CCD 采集辐照前后的图像,通过图像的变化判断损伤是否发生。

参照 ISO:21254 规范进行损伤测试,1[#]~3[#]样品由于尺寸较小,每一面选取相同分布的 5 个位置,

采用 R-on-1 激光损伤测试方法进行损伤测试,观测初始损伤点的形貌^[14];采用 1-on-1 激光损伤测试方法对 4[#]~8[#] 样品进行测试。损伤测试前,将样品固定在夹具上,使用已清除内部水汽的氮气枪清洁样品

表面,将附着在表面的灰尘及微小颗粒吹去。损伤测试结束后使用 Leica DMRXE 偏光显微镜观测损伤点的形貌,本实验中所有显微形貌图像的放大倍数均为 500 倍。

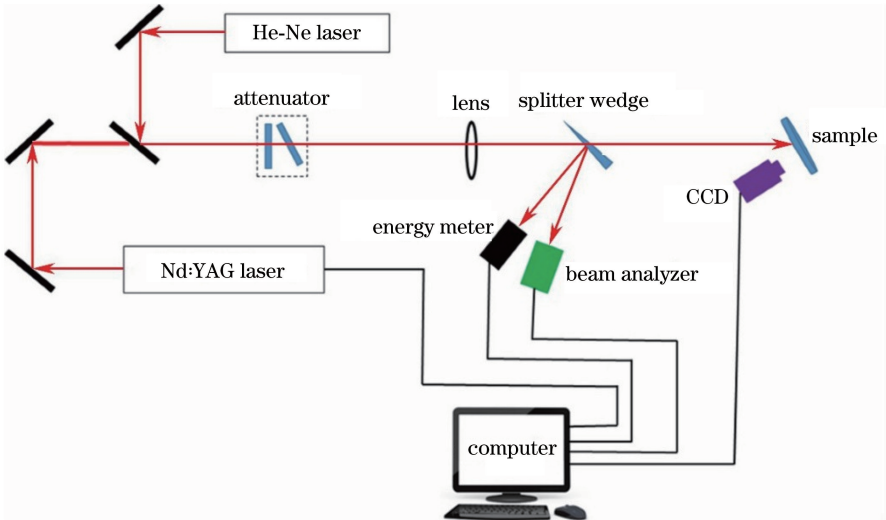


图 1 激光损伤阈值测试实验装置^[13]

Fig. 1 Experimental setup for laser damage threshold measurement^[13]

2.3 光热吸收测量

在激光作用下,晶体表面存在的微量激光吸收也会导致表面被破坏,研究晶体的光热吸收有助于了解其损伤机理。晶体受到激光辐照后,辐照区域的温度升高,并与周围区域形成温度梯度,由于折射率与温度相关,已形成的温度梯度会导致折射率梯度的形成。此时,一束探测光穿过受辐照区域时,探测光将会散焦,测量其散焦程度,即可推出样品的光热吸收值。

基于表面热透镜原理搭建的光热吸收测量装置如图 2 所示^[15-16]。泵浦光源为二极管 Q 开关 355 nm

固体激光器,可以实现从单发脉冲到 300 kHz 的输出,探测光源采用 632.8 nm 波长的 He-Ne 激光器。泵浦光经由半波片和偏振片组成的外部衰减器后被斩波器调制,然后经透镜聚焦后垂直入射到样品表面。探测光通过外部衰减器后由透镜聚焦,以与泵浦光成小角度的方式入射样品,然后经滤光片、小孔到达探测器。斩波器在调制泵浦光的同时输出同频信号至锁相放大器参考端,探测器的输出端连接万用表与锁相放大器输入端。在衰减系统与斩波器间使用功率计实时测量、监控泵浦光的功率。

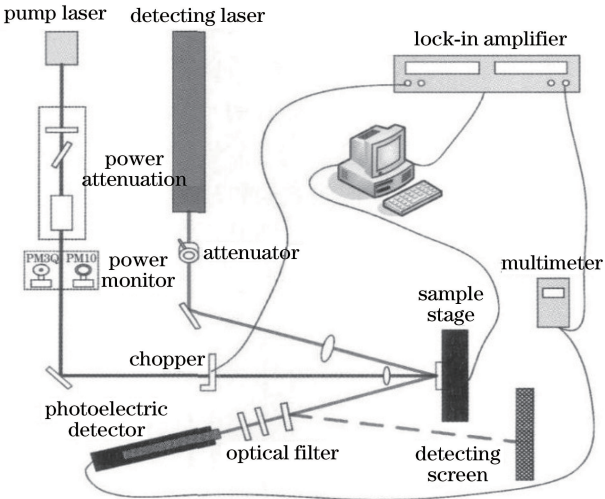


图 2 355 nm 光热吸收测量平台^[17]

Fig. 2 Measurement platform of 355-nm photothermal absorption^[17]

泵浦光在样品表面的光斑半径约为 $22\text{ }\mu\text{m}$, 探测光的光斑半径约为 $161\text{ }\mu\text{m}$ 。实验时, 通过移动样品台使泵浦光和探测光相交于表面的不同位置来实现样品表面不同位置处光热吸收的测量。在进行 R-on-1 损伤测试前, 先对 1[#]~3[#] 样品进行表面光热吸收测量, 每个面选择 5 个点(分布于 4 个角和中心)。本次实验仅研究晶面与光热吸收的关系, 结果给出的是相对百分比。

表 1 1[#]~3[#] 样品每个测试面的激光损伤阈值

Table 1 Laser damage thresholds of 1[#]-3[#] samples with different planes

1 [#]		2 [#]		3 [#]	
Plane	LIDT / (J·cm ⁻²)	Plane	LIDT / (J·cm ⁻²)	Plane	LIDT / (J·cm ⁻²)
(110)	12.8	Face 1	11.8	Face 1	14.8
Face 2	10.9	Face 2	14.8	(111)	10.0
Face 3	11.4	(100)	12.0	Face 3	10.8

对 4[#]~8[#] 样品进行 1-on-1 损伤测试后的激光损伤阈值如表 2 所示。激光能量密度与损伤概率的关系如图 3(a)所示。从图 3(a)可以看出, 损伤概率与激光能量密度无明显的线性关系, 无法通过线性拟合获得零几率损伤阈值。因此, 本文以零损伤概率的最大能量密度作为 CaF₂ 晶体的损伤阈值。测试时发现样品表面较差的加工质量可以解释损伤概率与能量密度的离散分布特征。图 3(b)为在线 CCD 拍摄的样品表面任意区域放大 5 倍的图像, 可

3 实验结果与讨论

3.1 激光损伤阈值

对 1[#]~3[#] CaF₂ 样品进行 R-on-1 损伤测试, 其激光损伤阈值(LIDT)如表 1 所示, 可见: 3[#]-(111) 面的损伤阈值在所有测试面中最低, 1[#]-(110) 和 2[#]-(100) 面损伤阈值相近, 且与其余测试面相比无明显差别。

见, 样品表面存在较多划痕及坑点。

表 2 4[#]~8[#] 样品的激光损伤阈值

Table 2 Laser damage thresholds of 4[#]-8[#] samples

Sample number	LIDT / (J·cm ⁻²)
4 [#]	12.6
5 [#]	7.7
6 [#]	10.2
7 [#]	8.5
8 [#]	7.4

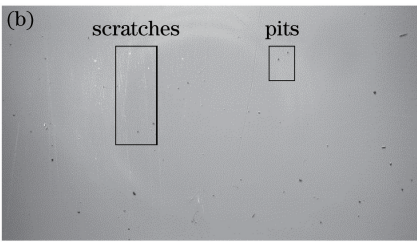
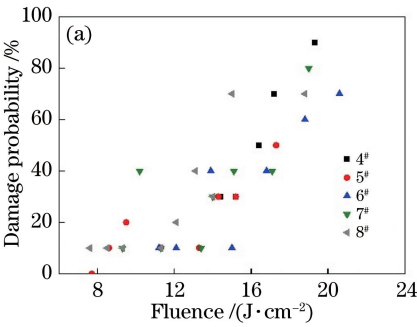


图 3 4[#]~8[#] 样品激光损伤概率及 5[#] 样品前表面形貌。(a) 激光损伤概率; (b) 5[#] 样品前表面形貌

Fig. 3 Laser damage probability of 4[#]-8[#] samples and front-surface morphology of 5[#] sample.

(a) Laser damage probability; (b) front-surface morphology of 5[#] sample

3.2 光热吸收

1[#]~3[#] 样品表面的光热吸收测试结果如图 4 所示。从图 4 可以看出, 不同面的光热吸收结果存在波动。因为光热吸收对样品表面的杂质和缺陷比较敏感, 所以数值的浮动是难免的, 但在浮动之外可以明显看出 3[#]-(111) 面的光热吸收在所有测试面中最高, 该面的光热吸收达到了 0.211%, 比 3[#] 样品另外两个测试面高出一倍, 其余样品各面光的热吸收值为 0.135%~0.17%, 这说明晶面的结构差异是

3[#]-(111) 面拥有最高光热吸收的原因。

3.3 损伤形貌

图 5 为 1[#]-(110) 面与 2[#]-(100) 面的损伤形貌, 图 6 为 3[#] 样品三个测试面的损伤形貌。

对 CaF₂ 晶体不同晶面的损伤形貌进行观察后发现, 3[#]-(111) 面与其他晶面的损伤形貌存在明显差异。从图 5 和图 6 可以看出, 3[#]-(111) 面在激光作用下的损伤点处存在明显的材料开裂现象, 损伤形貌为片层状剥离, 且片层状剥离区域中心存在熔

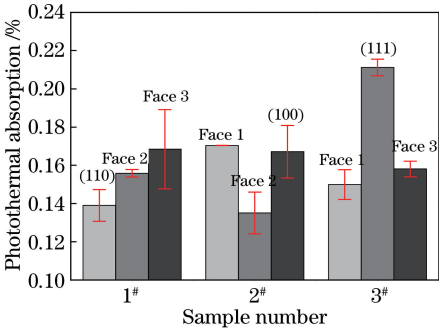


图 4 CaF₂ 晶体表面光热吸收的测试结果
Fig. 4 Results of photothermal absorption measurement for CaF₂ crystal with different planes

融坑,熔融坑尺寸小于 50 μm,周围片层状剥离区域比熔融坑的尺寸大;2[#]-(110)、1[#]-(100)、3[#]-Face 1

以及 3[#]-Face 3 损伤点形貌均为熔融坑,且熔融坑尺寸相似,长度和宽度均为 50~100 μm。

图 7 所示为进行 1-on-1 损伤测试后选取 4[#]~8[#] 样品中的典型损伤形貌,可以看出,(111)面的损伤形貌也呈现片层状剥离。

3.4 分析与讨论

CaF₂晶体是典型的面心立方结构,Ca²⁺为立方体配位,F⁻为四面体配位。在 2[#]样品和 1[#]样品中不存在与(111)晶面原子排布顺序相同的面。而 CaF₂晶体仅有(111)面在 355 nm 脉冲光作用下光热吸收最高,阈值最低,损伤点呈片层状剥离;其(100)面及(110)面在 355 nm 脉冲光作用下的损伤阈值相近,损伤点为熔融坑。

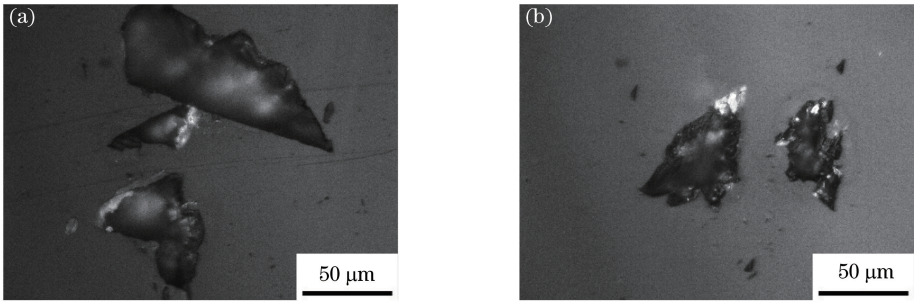


图 5 损伤形貌。(a) 1[#]-(110);(b) 2[#]-(100)
Fig. 5 Damage morphologies. (a) 1[#]-(110); (2) 2[#]-(100)

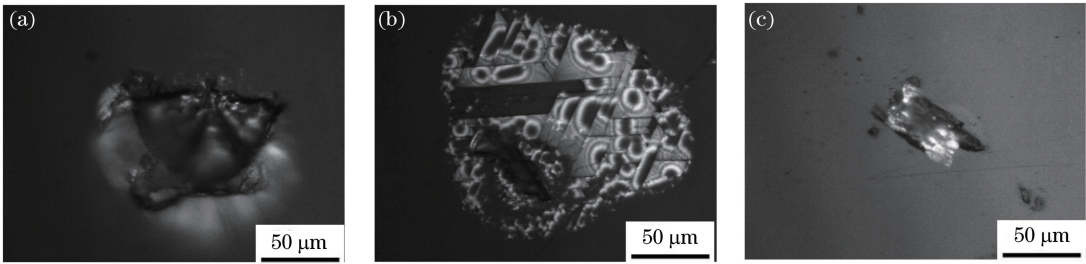


图 6 3[#]样品三个测试面的损伤形貌。(a) 3[#]-Face 1;(b) 3[#]-(111);(c) 3[#]-Face 3
Fig. 6 Damage morphologies of different planes of 3[#] sample. (a) 3[#]-Face 1; (b) 3[#]-(111); (c) 3[#]-Face 3

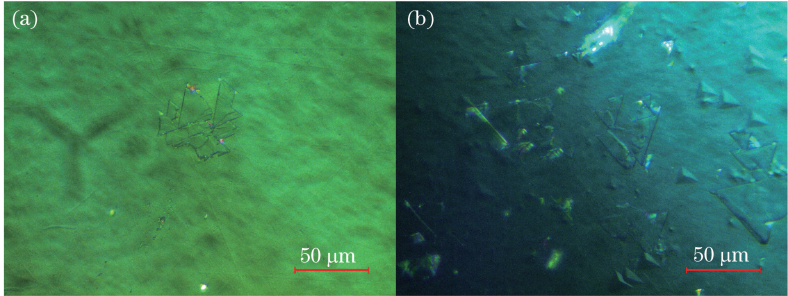


图 7 损伤点形貌。(a) 4[#]-14.4 J·cm⁻²;(b) 7[#]-15.0 J·cm⁻²
Fig. 7 Damage spot morphologies. (a) 4[#] sample with 14.4 J·cm⁻² energy density;
(b) 7[#] sample with 15.0 J·cm⁻² energy density

结合光热吸收与激光损伤测试结果可知,(111)面的光热吸收强于(100)面及(110)面,说明(111)面在同等脉冲激光作用下最易吸收激光能量,并造成破坏,使得(111)面的损伤阈值低于其他晶面。由于 CaF_2 晶体解理面的面间引力小,在低能量脉冲激光作用下,材料内部已产生较大的机械应力,随后在(111)面熔融坑附近发生大面积片层状剥离,导致(111)面形成独特的熔融坑及周围区域呈片层状剥离的特殊损伤形貌,且熔融坑尺寸小于(100)面及(110)面。这说明 CaF_2 晶体的结构会造成其性能上的差异,因此在高功率激光系统中应避免使用(111)面作为光学元件的表面。

样品在进行 1-on-1 损伤测试后的损伤点形貌也呈片层状剥离。损伤阈值在表面质量的影响下离散分布,说明表面质量会降低 CaF_2 晶体的损伤阈值,所以在加工时应重点控制表面质量,避免出现划痕和坑点。

4 结 论

通过对 CaF_2 样品的(100)、(111)和(110)晶面进行 355 nm 光热吸收实验及激光损伤测试,得到以下结论:晶面与光热吸收、损伤阈值及损伤点形貌相关;在激光作用下,(111)面的光热吸收最强,最容易吸收激光能量使损伤阈值低于其他晶面;(111)面间存在着较大的机械应力,使损伤点呈片层状剥离,而(100)及(110)晶面在激光作用下仅会产生熔融坑;样品表面由加工形成的划痕和坑点对测试结果有很大影响,所以将 CaF_2 晶体作为 355 nm 波长的基底材料时,应避免使用(111)晶面。

参 考 文 献

- [1] Dong Y J, Zhou G Q, Yang W Q, *et al.* Research and development of calcium fluoride crystals [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2003, 40(8): 43-47.
董永军, 周国清, 杨卫桥, 等. 氟化钙(CaF_2)晶体研发进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2003, 40(8): 43-47.
- [2] Li Y H, Jiang G J. Study on application of CaF_2 single crystal [J]. *Journal of Synthetic Crystals*, 2000, 29(5): 221.
李艳红, 姜国经. CaF_2 单晶体应用研究[J]. *人工晶体学报*, 2000, 29(5): 221.
- [3] Duan A F, Shen Y H, Liu J H. Spectra of large-sized calcium fluoride single crystals [J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2007, 35(1): 85-87.

- 段安锋, 沈永宏, 刘景和. 大尺寸氟化钙单晶的光谱特性[J]. *硅酸盐学报*, 2007, 35(1): 85-87.
- [4] Su L B, Xu J. Calcium fluoride crystal material and its application [M]. Beijing: Science Press, 2006.
苏良碧, 徐军. 氟化钙晶体材料及其应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [5] Ye C, Qiu R, Jiang Y, *et al.* Laser induced damage characteristics in fused silica surface irradiated by 1064 nm and 532 nm ns laser simultaneously [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2018, 30(4): 041003.
叶成, 邱荣, 蒋勇, 等. 1064 nm 和 532 nm 纳秒激光同时辐照熔石英损伤规律的研究[J]. *强激光与粒子束*, 2018, 30(4): 041003.
- [6] Shen Y H, Wang Q, Yan D M, *et al.* Diameter 210 mm calcium fluoride crystal growth [J]. *Journal of Synthetic Crystals*, 2007, 36(3): 490-493, 525.
沈永宏, 王琦, 闫冬梅, 等. 直径 210 mm 氟化钙晶体的生长 [J]. *人工晶体学报*, 2007, 36(3): 490-493, 525.
- [7] Su L B, Xu J, Yang W Q, *et al.* Growth and application of CaF_2 single crystal [J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2003, 31(12): 1202-1207.
苏良碧, 徐军, 杨卫桥, 等. 氟化钙晶体的生长和应用研究[J]. *硅酸盐学报*, 2003, 31(12): 1202-1207.
- [8] Zhang Q H, Zhen X H, Shi D W, *et al.* Growth of high-quality CaF_2 crystal with $\Phi 370$ mm [J]. *Journal of Synthetic Crystals*, 2016, 45(12): 2935-2936.
张钦辉, 甄西合, 史达威, 等. $\Phi 370$ mm 高质量 CaF_2 晶体的生长 [J]. *人工晶体学报*, 2016, 45(12): 2935-2936.
- [9] Gogoll S, Stenzel E, Reichling M, *et al.* Laser damage of CaF_2 (111) surfaces at 248 nm [J]. *Applied Surface Science*, 1996, 96/97/98: 332-340.
- [10] Azumi M, Nakahata E. Study of relation between crystal structure and laser damage of calcium fluoride [J]. *Proceedings of SPIE*, 2010, 7842: 78421U.
- [11] Dong Y J, Zhou G Q, Su L B, *et al.* Study of the inclusion of calcium fluoride crystals grown by TGT [J]. *Journal of Synthetic Crystals*, 2004, 33(1): 31-34.
董永军, 周国清, 苏良碧, 等. 温梯法生长 CaF_2 晶体中包裹物的研究 [J]. *人工晶体学报*, 2004, 33(1): 31-34.
- [12] Su L B, Xu J, Dong Y J, *et al.* Characteristics and optical spectra of $\text{U}:\text{CaF}_2$ crystal grown by TGT [J]. *Journal of Crystal Growth*, 2004, 261(4): 496-501.
- [13] Shan C, Zhao Y A, Zhang X H, *et al.* Study on laser damage threshold of optical element surface based on Gaussian pulsed laser spatial resolution [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(1): 0104002.

单翀, 赵元安, 张喜和, 等. 基于高斯脉冲激光空间分辨测量光学元件表面激光损伤阈值研究[J]. 中国激光, 2018, 45(1): 0104002.

[14] Liu X F. Integration control of the small-beam raster-scan laser conditioning system and process optimization [D]. Shanghai: University of Chinese Academy of Sciences, 2011: 4.

刘晓凤. 小光斑扫描激光预处理系统集成控制与工艺优化[D]. 上海: 中国科学院大学, 2011: 4.

[15] Li X P, Jiang X D, Zheng W G, *et al.* The principle and application for transmission photo-thermal lens technique[J]. Optical Instruments, 2008, 30(1): 34-39.

李绪平, 蒋晓东, 郑万国, 等. 透射式光热透镜技术的原理和应用[J]. 光学仪器, 2008, 30(1): 34-39.

[16] Fan S H. High sensitive weak absorption apparatus for optical coating [D]. Shanghai: University of Chinese Academy of Sciences, 2005: 24-25.

范树海. 表面热透镜技术应用于薄膜微弱吸收测量的理论和实验[D]. 上海, 中国科学院大学, 2005: 24-25.

[17] Xu J H, Zhao Y A, Shao J D, *et al.* Absorption and laser induced damage threshold of TiO₂ single films under different process conditions [J]. Chinese Journal of Lasers, 2012, 39(4): 0407001.

徐俊海, 赵元安, 邵建达, 等. 不同工艺条件下 TiO₂ 单层膜的吸收和损伤阈值测试[J]. 中国激光, 2012, 39(4): 0407001.