



·光学元件激光损伤·综述·

## 紫外氟磷玻璃的高能激光损伤研究进展\*

李生武<sup>1,2</sup>, 万 瑞<sup>1,2</sup>, 马 园<sup>1,2</sup>, 曹 欣<sup>1,2</sup>, 高 飞<sup>1,2,3</sup>, 王鹏飞<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院 西安光学精密机械研究所 瞬态光学与光子技术国家重点实验室, 西安 710119; 2. 中国科学院大学 材料科学与光电技术学院, 北京 100045; 3. 西安交通大学 电子与信息学部, 西安 710049)

**摘 要:** 激光驱动惯性约束聚变 (ICF), 因有望解决全球能源危机问题而备受瞩目。然而, 熔石英作为 ICF 装置终端光学组件中一类重要的功能性紫外元件, 其高能激光诱导损伤问题成为限制 ICF 装置输出能量向更高更强方向发展的关键因素。因此, ICF 装置负载能力持续提升对新型高抗强激光损伤紫外元件提出重大应用需求。综述了中国科学院西安光学精密机械研究所研制的紫外氟磷玻璃在高能紫外激光损伤方面的研究现状, 并分析了现存的实际问题, 最后对高抗损伤紫外氟磷玻璃的发展方向进行了展望。

**关键词:** 惯性约束聚变; 激光诱导损伤; 氟磷玻璃

中图分类号: V254.2

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202335.220404

## Research progress in high-energy laser-induced damage of ultraviolet fluorophosphate glass

Li Shengwu<sup>1,2</sup>, Wan Rui<sup>1,2</sup>, Ma Yuan<sup>1,2</sup>, Cao Xin<sup>1,2</sup>, Gao Fei<sup>1,2,3</sup>, Wang Pengfei<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China;

2. Center of Materials Science and Optoelectronics Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100045, China;

3. Faculty of Electronic and Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract:** Laser driven inertial confinement fusion (ICF) has attracted much attention for its potential to solve the global energy crisis. As fused silica is an important functional ultraviolet (UV) element in the final optics assembly of ICF device, its laser-induced damage has become a key factor limiting the development of ICF output energy to a stronger and higher level. Therefore, the further increase of ICF output energy puts forward a significant application demand for the new UV components that have superior UV laser-induced damage resistance. In this paper, the research status of high-energy UV laser-induced damage of UV fluorophosphate glasses developed by Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, CAS was reviewed, and the existing practical problems are analyzed. Finally, the development direction of UV fluorophosphate glasses with high laser-induced damage resistance is prospected.

**Key words:** inertial confinement fusion, laser-induced damage, fluorophosphate glass

激光驱动惯性约束聚变 (ICF) 利用上百束高能紫外激光束作为驱动源, 对称聚焦于装有聚变燃料 (由氢原子的两个同位素氘 ( $D_1$ ) 和氚 ( $D_2$ ) 混合而成) 的微球靶丸外围, 提供高强度能量以压缩氘氚燃料使其燃烧, 释放聚变能<sup>[1-3]</sup>。这种受控核聚变反应不会产生碳排放和温室气体, 并且所使用的氘氚燃料可从海水中无限提取, 是获取几乎取之不尽清洁能源的主要途径, 因此被公认为是解决能源危机和发展清洁能源的曙光<sup>[4-7]</sup>, 驱动了世界各国在 ICF 领域的激烈竞争。

随着高能激光技术的逐步革新, ICF 装置的研制得到快速发展。美国作为世界上最早开展 ICF 装置研制的国家, 所建成的“国家点火装置 (NIF)”旨在通过 192 路激光束形成 1.8 MJ 的聚焦能量, 用于触发聚变点火<sup>[8-10]</sup>。2021 年 8 月 NIF 装置取得了里程碑进展: 首次实现 1.3 MJ 的内爆能, 距离点火成功目标仅有一步之遥<sup>[11]</sup>, 这一突破性进

\* 收稿日期: 2022-12-27; 修订日期: 2023-04-18

基金项目: 国家自然科学基金项目 (61775235); 陕西省重点研发项目 (2021GY-251, 2021GY-219); 中国科学院青年创新促进会项目 (2017446)

联系方式: 李生武, lishengwu2017@opt.cn。

通信作者: 高 飞, gaofei1980@opt.ac.cn;

王鹏飞, pfwang@opt.ac.cn。

展将 ICF 的研究推向了新的高度,也验证了 ICF 在科学、技术工程上的可行性。

在 ICF 装置终端光学组件中布局了大量的大口径紫外光学元件。据统计, NIF 装置中包含了 7648 个大口径 (0.5~1.0 m) 光学元件, 其中有 15% 布局在终端光学组件中<sup>[12]</sup>, 例如用作聚焦透镜、光束取样光栅、衍射光学元件、主屏蔽片的熔石英<sup>[13-14]</sup>, 用于谐波转换、偏振匀滑的 KDP 和 DKDP 晶体<sup>[15-16]</sup> 等。世界上大部分 ICF 装置均采用“多程放大传输”设计路线, 以神光-III 为例, 前端系统产生的纳焦耳 (nJ) 级 1053 nm 激光脉冲经“四程放大传输”放大至千焦耳 (kJ) 级, 最终注入终端光学组件中, 1053 nm 激光被谐波转换器件转换至 351 nm, 并聚焦至真空靶室<sup>[17]</sup>, ICF 装置终端光学组件是承受三倍频激光能量最高的单元。此外, ICF 装置能够实现点火目标的条件是聚变反应释放能量与激光驱动能量盈亏平衡。为了获取清洁且无穷的聚变能, 需要输入较高的激光驱动能量, 以期实现能量增益大于 1, 使得用于 ICF 研究的最终输入激光驱动能量均在千焦耳 (kJ) 量级, 甚至达到了兆焦耳 (MJ) 级别。

然而, 熔石英作为 ICF 装置终端光学组件中一类重要的功能性元件, 由 Ce、Fe、Cu、Al 等吸收性杂质粒子<sup>[18-22]</sup>、非桥接氧空穴中心 (NBOHC)<sup>[23-25]</sup> 等结构性缺陷, 以及划痕、裂缝、孔洞等破坏性缺陷<sup>[26-29]</sup> 引起的激光损伤问题成了 ICF 装置输出通量进一步提升的瓶颈。即便 NIF 装置 2021 年取得了重大突破, 美国劳伦斯利弗莫尔国家实验室 (LLNL) 运营经理 Wouterghem 依旧认为熔石英等光学元件的抗激光损伤能力是 NIF 装置平稳运行的关键<sup>[30]</sup>。因此, 位于 ICF 装置终端光学组件中的熔石英等元件对高能紫外激光的负载能力是确保 ICF 装置平稳可靠运行且输出通量向更高更强方向发展的关键因素。

为提升熔石英的抗激光损伤性能, 衍生出了诸如刻蚀<sup>[31-34]</sup>、磁流变抛光<sup>[35]</sup>、激光预处理<sup>[36-37]</sup> 等处理工艺以消除熔石英中激光诱导损伤前驱体的含量, 以降低激光损伤发生的概率, 提升元件的使用寿命。通过其中一种或者多种先进的处理工艺相互结合处理熔石英元件表面, 虽然一定程度上能够提升熔石英的紫外激光损伤阈值, 然而仍未从根本上彻底解决工程中的熔石英元件激光损伤问题。

开发兼具紫外高透和高紫外激光损伤阈值的光学材料以有效解决熔石英元件的损伤问题, 被认为是提升 ICF 装置的激光输出通量和总体性能的一种创新途径。目前关于紫外高透的光学材料主要有以下几种: 氟化物玻璃或晶体、磷酸盐玻璃和氟磷酸盐玻璃。

氟化物晶体或玻璃和磷酸盐玻璃因具有较宽的带隙、宽的透过窗口、低的非线性折射率系数等优点, 满足高能激光系统对光学元件高紫外透过率的需求, 被认为是新型的紫外激光材料<sup>[38-41]</sup>, 特别是掺钕磷酸盐玻璃在国内外 ICF 装置中作为激光产生和放大介质的成功应用<sup>[12,41]</sup>, 其在基频光处 (1053 nm) 表现出的优异抗激光损伤特性, 折射出磷酸盐基玻璃可作为新型光学元件应用于 ICF 装置终端光学组件的潜能。但由于氟化物晶体和氟化物玻璃制备条件苛刻, 制备出适用于激光聚变工程应用的大尺寸 (大于 430 mm×430 mm)、高光学质量的光学元件十分困难, 另外, 磷酸盐玻璃在熔炼制备过程中引入的铂金颗粒使其在紫外三倍频波长区的吸收增加<sup>[42-43]</sup>, 致使玻璃的抗激光损伤性能骤减, 因此它们至今都未能在 ICF 装置终端光学组件中得到应用。

氟磷酸盐玻璃综合了氟化物玻璃和磷酸盐玻璃的优点, 使其较适宜作为高能激光系统的高损伤阈值材料使用。中科院西安光机所开发了一系列新型紫外氟磷玻璃, 这些材料兼具三倍频紫外光透过高、抗紫外老化特性良好、紫外激光损伤阈值和损伤增长阈值高于熔石英等优良特性, 有望替代熔石英作为激光聚变用新型强激光紫外光学元件。

本文综述了中国科学院西安光学精密机械研究所研制的氟磷酸盐紫外玻璃在紫外激光特性、损伤机理、微观缺陷调控方法等方面的研究现状, 并分析了现存的实际问题, 最后对高抗损伤紫外氟磷玻璃的发展方向进行了展望。

## 1 紫外氟磷玻璃的性能

### 1.1 紫外氟磷玻璃的透过性能

如图 1 所示, 中国科学院西安光学精密机械研究所于 2016 年研制的紫外氟磷玻璃在 351 nm 处的内透过率 (10 mm 厚) 达到了 99.5%<sup>[44]</sup>, 表现出同熔石英相当的高紫外透过性能<sup>[45]</sup>。并且经 351 nm 高能激光脉冲辐照 500 发次后, 其三倍频紫外透过率下降量保持稳定 (0.66%), 表现出良好的抗紫外老化特性<sup>[46]</sup>。

### 1.2 紫外氟磷玻璃的损伤特性

根据国际标准 ISO21254 中的 1-on-1 模式测试了 7 mm 厚的紫外氟磷玻璃和熔石英元件的紫外激光损伤概率 (351 nm, 6.8 ns)<sup>[44]</sup>。两种光学元件在同等条件下进行表面抛光, 控制表面粗糙度均低于 1 nm, 元件未进行镀膜、酸洗等特殊处理。测试结果如图 2 所示, 紫外氟磷玻璃在 351 nm 处的激光诱导损伤阈值为 13.5 J·cm<sup>-2</sup>, 是熔石英激光

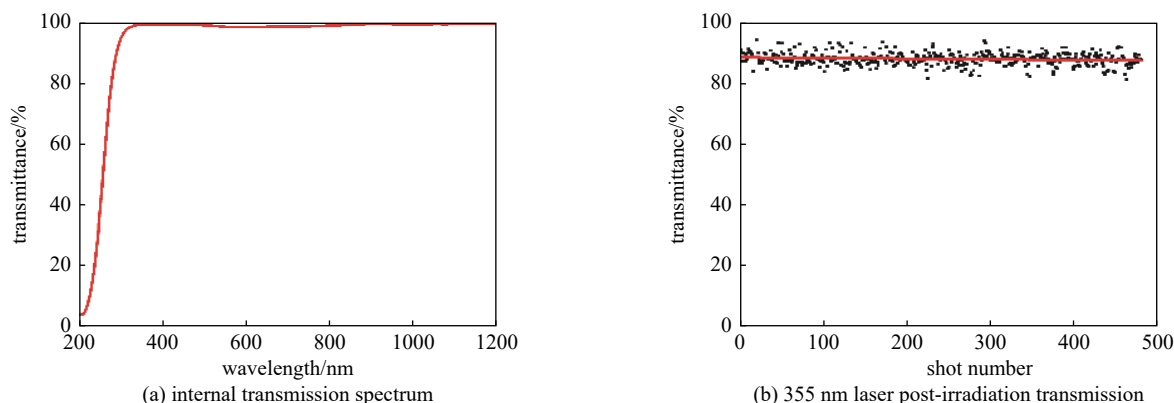


Fig. 1 Transmission spectra of ultraviolet (UV) fluorophosphate glass

图1 紫外氟磷玻璃的内透过谱<sup>[44]</sup>和355 nm激光辐照下的强光透过谱<sup>[46]</sup>

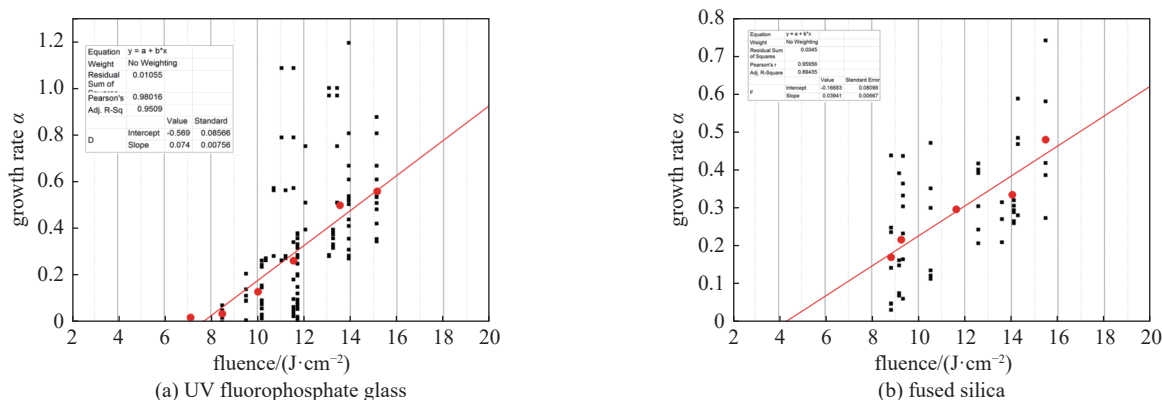


Fig. 2 Damage growth of tested optics under 351 nm laser irradiation

图2 351 nm激光辐照下的测试元件损伤增长

诱导损伤阈值( $6.3 \text{ J}\cdot\text{cm}^{-2}$ )的2倍之多。进一步对比这两种光学元件的激光诱导损伤增长特性,紫外氟磷玻璃表现出 $7.8 \text{ J}\cdot\text{cm}^{-2}$ 的损伤增长阈值,同样远高于同等测试条件下熔石英元件的 $4.2 \text{ J}\cdot\text{cm}^{-2}$ 。随着玻璃制备工艺的不断优化改进,如图3所示,使用同样的测试方法获得2020年研制紫外氟磷玻璃的351 nm激光损伤阈值达到了 $16.99 \text{ J}\cdot\text{cm}^{-2}$ (5 ns, 10 mm厚)。

## 2 紫外氟磷玻璃的高能激光损伤研究

### 2.1 紫外氟磷玻璃中的微观缺陷

中国科学院西安光学精密机械研究所研制的紫外氟磷玻璃氟含量较低,因此玻璃的网络结构主要以磷氧四面体连接的磷链为主。玻璃配方组成中添加的部分碱金属和碱土金属成分能够引起主磷链的部分断裂,增加了玻璃中的非桥接氧含量,会形成诸如磷氧空位缺陷中心(POHC)、氧空位缺陷中心(OHC)以及 $\text{PO}_2\text{-EC}$ 、 $\text{PO}_3\text{-EC}$ 、 $\text{PO}_4\text{-EC}$ 等电子缺陷中心,缺陷中心结构示意图如图4所示,这些微观缺陷在紫外至可见光波段产生很大的吸收<sup>[47-48]</sup>,是紫外氟磷玻璃中主要的色心缺陷。针对紫外氟磷玻璃中微观缺陷的系统性研究证实玻璃的配方组成、熔制气氛、热处理以及 $\gamma$ 射线辐照等因素都能显著影响这些缺陷的含量,

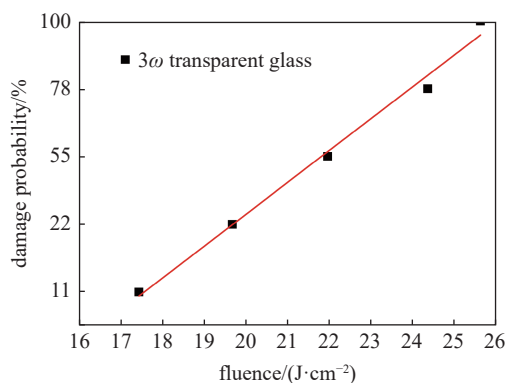


Fig. 3 351 nm laser-induced damage threshold of UV fluorophosphate glass developed in 2020

图3 2020年研制的紫外氟磷玻璃的351 nm激光诱导损伤阈值

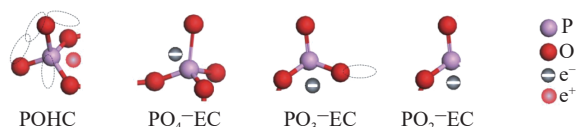


Fig. 4 Schematic diagram of POHC,  $\text{PO}_4\text{-EC}$ ,  $\text{PO}_3\text{-EC}$  and  $\text{PO}_2\text{-EC}$  defects in UV fluorophosphate glass

图4 紫外氟磷玻璃中POHC、 $\text{PO}_4\text{-EC}$ 、 $\text{PO}_3\text{-EC}$ 和 $\text{PO}_2\text{-EC}$ 缺陷中心结构示意图<sup>[46]</sup>

进而导致玻璃的紫外吸收特性及激光诱导损伤特性发生变化<sup>[49-50]</sup>。

## 2.2 配方组成调控微观缺陷

激光辐照诱导光学元件损伤的核心问题是材料对入射激光的吸收机制。因此通过调控玻璃中位于紫外吸收区的微观缺陷含量,降低材料的紫外吸收能力是提升其抗激光损伤性能的有效途径。调整玻璃中  $\text{H}_3\text{BO}_3$  和  $\text{SiO}_2$  的配比,获得紫外吸收截止边蓝移的紫外氟磷玻璃,随着玻璃紫外吸收截止边的蓝移,玻璃在 351 nm 处的透过率依次增加,分别为 87.7%(GT1)、90.3%(GT2)、90.4%(GT3)<sup>[51]</sup>。对应紫外吸收截止边蓝移程度最大的紫外氟磷玻璃(GT3),其 351 nm 激光损伤阈值最高,为  $8.7 \text{ J}\cdot\text{cm}^{-2}$ ,其次为 GT2 玻璃的  $7.9 \text{ J}\cdot\text{cm}^{-2}$  和 GT1 玻璃的  $6.9 \text{ J}\cdot\text{cm}^{-2}$ <sup>[51]</sup>,表明紫外吸收截止边蓝移对紫外氟磷玻璃激光损伤阈值有一定的改善作用。

## 2.3 熔制温度调控微观缺陷

紫外氟磷玻璃中引起紫外光区域相关微观缺陷的产生同样受玻璃熔制工艺的影响。玻璃熔制温度作为熔制工艺过程的重要参数,也可对调控玻璃的紫外吸收截止边起作用。如图 5 和图 6 所示,分别以 1000 °C 和 1200 °C 两种熔制温度制备的紫外氟磷玻璃在 355 nm 处的内透过率分别为 99.5% 和 99.4%<sup>[52]</sup>,虽然内透过率数值变化不大,但是随着玻璃熔制温度的降低,紫外氟磷玻璃的紫外吸收截止边呈现约 50 nm 的蓝移,其对应 355 nm 激光损伤阈值由  $14.44 \text{ J}\cdot\text{cm}^{-2}$  提升至  $18.32 \text{ J}\cdot\text{cm}^{-2}$ <sup>[52]</sup>。

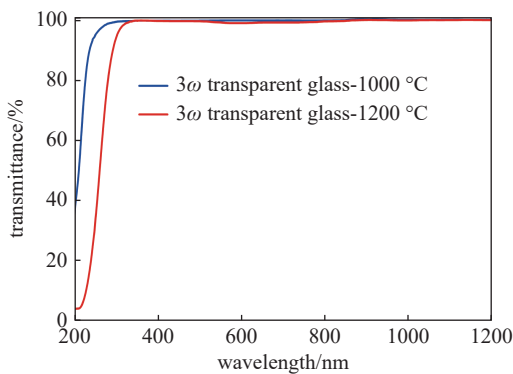


Fig. 5 Internal transmission spectra of UV fluorophosphate glasses prepared at different melting temperature

图 5 不同熔制温度制备的紫外氟磷玻璃内透过率光谱<sup>[52]</sup>

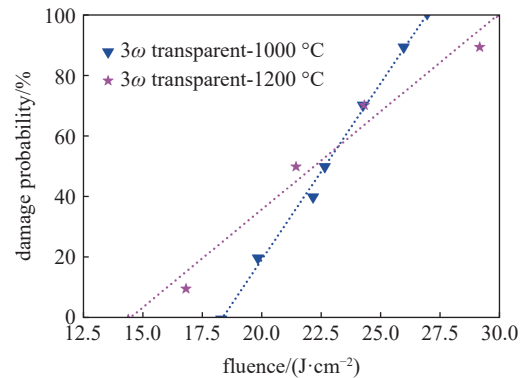


Fig. 6 Laser-induced damage threshold of UV fluorophosphate glasses prepared at different melting temperature (355 nm, 6.7 ns, 1-on-1 mode)

图 6 不同熔制温度制备的紫外氟磷玻璃的激光损伤阈值 (355 nm, 6.7 ns, 1-on-1)<sup>[52]</sup>

现有关于光学元件的激光损伤机理主要有热致损伤<sup>[53-54]</sup>、电子雪崩<sup>[55]</sup>、自聚焦损伤<sup>[56]</sup>等,热致损伤源于光学元件中的缺陷吸收入射的激光能量形成高温高压环境冲击玻璃基质,与元件对入射激光的吸收系数相关;电子雪崩源于元件中自由电子在吸收入射的激光能量后经多次碰撞作用引起元件局部区域电子态密度激增形成冲击波,与元件的禁带宽度有关。调整玻璃的配方组成及熔制温度,均使紫外氟磷玻璃的紫外吸收截止边蓝移,并且截止边的蓝移对玻璃激光诱导损伤阈值的提升起促进作用。紫外氟磷玻璃中由  $\text{PO}_3\text{-EC}$  和  $\text{PO}_4\text{-EC}$  缺陷引起的吸收决定材料的紫外吸收截止边,玻璃的紫外吸收截止边的蓝移,表明玻璃中  $\text{PO}_3\text{-EC}$  和  $\text{PO}_4\text{-EC}$  缺陷的含量降低。由于玻璃紫外吸收截止边对应的光子能量被定义为光学带隙(禁带宽度),其越靠近紫外,对应玻璃的禁带宽度越高。因此由  $\text{PO}_3\text{-EC}$  和  $\text{PO}_4\text{-EC}$  缺陷含量降低引起玻璃紫外吸收截止边蓝移,改善材料激光损伤阈值的内涵包括两方面:第一,玻璃紫外吸收截止边的蓝移,减弱了玻璃对入射紫外高能激光的吸收,这就降低了因热能沉积引起的损伤而提升玻璃的抗激光损伤性能;第二,玻璃紫外吸收截止边的蓝移,导致玻璃的禁带宽度增加,有利于降低电子雪崩发生的概率,玻璃的抗激光损伤性能得以提升。

## 2.4 退火处理调控微观缺陷

紫外氟磷玻璃中的微观缺陷含量同样也会受热处理工艺的影响。根据玻璃的 DSC 曲线,以玻璃的转变温度(410 °C)为退火温度点进行同样长时间(8 h)的保温后,分别采用 2、5、10 °C/h 对紫外氟磷玻璃进行退火处理,对应处理后玻璃的 351 nm 激光损伤阈值分别为 10.3、9.5、8.7  $\text{J}\cdot\text{cm}^{-2}$ <sup>[51]</sup>,表明退火精度也能够提升紫外氟磷玻璃的激光损伤阈值。从宏观方面看,由于降低降温速率的精密退火处理后降低了玻璃材料中的热应力,削弱了由应力对光的传播波前影响。从微观方面看,精密退火能够在一定程度上改变玻璃的微观结构,减少了玻璃中相关微观结构缺陷,进而因缺陷诱导光吸收能力的降低使玻璃的激光损伤阈值得到提升。

## 2.5 紫外氟磷玻璃的激光损伤机理研究

在 高能紫外激光辐照过程中发现, 紫外氟磷玻璃表现出较高激光损伤阈值的同时, 还呈现出特殊的体内黄绿色柱状发光现象<sup>[44]</sup>, 并且强激光辐照玻璃诱导发光越强, 对应材料的激光损伤阈值越高。进一步研究发现具有某种特定结构的玻璃, 才会产生激光诱导发光现象, 因此推测紫外氟磷玻璃的高损伤阈值特性与玻璃中的特定微观结构缺陷紧密相关。

使用 253、280、350 nm 三种高能紫外激光激发所研制的紫外氟磷玻璃, 在玻璃中均观察到了分别由  $\text{PO}_3\text{-EC}$  和  $\text{POHC}$  缺陷引起的位于 450 nm 左右和 780 nm 左右的两个特征荧光<sup>[49]</sup>。基于瞬态荧光光谱技术研究的玻璃中位于 450 nm 左右和 780 nm 左右两个特征荧光的瞬时衰减过程, 如图 7 所示, 表明位于 450 nm 荧光的衰减过程慢于位于 780 nm 附近的荧光, 计算出玻璃中这两个特征荧光峰的寿命分别为 3.508 ms 和 1.085 ms<sup>[57]</sup>。进一步对比发现紫外氟磷玻璃两个荧光峰寿命最长, 对应地其在 351 nm@6.8 ns 高能激光作用下的激光损伤阈值也最高, 达到了  $14.44 \text{ J}\cdot\text{cm}^{-2}$ <sup>[57]</sup>。

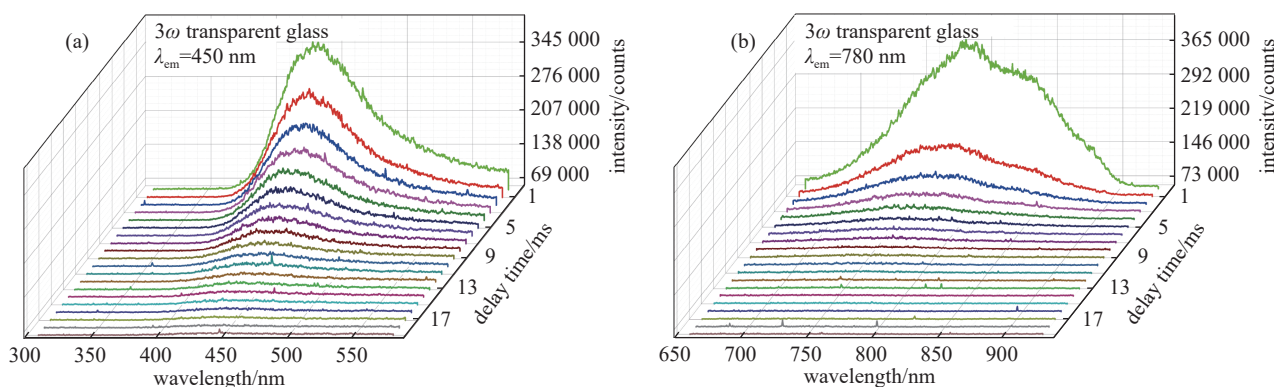


Fig. 7 Dynamic decay processes of 450 nm and 780 nm fluorescence in the UV fluorophosphate glass

图 7 紫外氟磷玻璃中 450 nm 和 780 nm 特征荧光的动态变化<sup>[57]</sup>

荧光的量子产率指的是材料辐射荧光的光子数与吸收激光的光子数之间的比值。由于荧光的寿命与量子产率成正比关系, 即越长的荧光寿命说明材料释放的吸收能量越多。

基于紫外氟磷玻璃中这种荧光寿命长-激光损伤阈值高的关系, 获得了高能紫外激光诱导紫外氟磷玻璃的损伤机理: 高能激光辐照诱导紫外氟磷玻璃产生由  $\text{PO}_3\text{-EC}$  和  $\text{POHC}$  缺陷引发的荧光, 并且所产生的荧光寿命较长, 以“发光”方式释放吸收的激光能量, 导致玻璃体内部积累的能量降低, 降低了热损伤和机械损伤出现的概率, 最终使玻璃的抗激光损伤能力得以提升。

因此, 通过优化玻璃的熔制工艺来调节紫外氟磷玻璃中相关微观缺陷的含量是一种可行的调控玻璃抗激光损伤性能的新型途径。通过合适的熔制温度, 降低玻璃中紫外吸收缺陷浓度(更低的紫外光吸收系数)、增加玻璃的禁带宽度(更低的雪崩电离发生概率)和荧光发射强度及寿命(更多的吸收能量释放), 通过调控这些因素来共同调控增强所研制氟磷玻璃的抗激光损伤性能。

## 3 目前存在问题

在研究中发现, 熔石英的激光诱导损伤主要表现为后表面的熔融损伤<sup>[58-59]</sup>, 而紫外氟磷玻璃在 高能激光作用下一旦 发生损伤, 会在玻璃中出现由后表面向体内延伸并平行于激光入射方向的丝状损伤<sup>[51]</sup>。如图 8 所示, 众所周知, 光学玻璃体内的丝状损伤与非线性自聚焦效应相关, 实验测试紫外氟磷玻璃的非线性折射率  $n_2=1.07\times 10^{-13} \text{ esu}$ , 高于熔石英元件的  $n_2=0.85\times 10^{-13} \text{ esu}$ <sup>[60]</sup>, 这也进一步说明紫外氟磷玻璃的体内丝状损伤产生原因来自于自聚焦效应。

虽然紫外氟磷玻璃的损伤阈值、损伤增长阈值和体损伤阈值均远高于现设计 ICF 装置的需求能量, 但是从未来 ICF 的实际应用发展方向来说, 仍需进一步提高装置的输入激光能量来获得更高的聚变能, 从而降低现存 ICF 装置激光光路的数量以降低装置建设成本。这就对装置中终端光学组件的抗激光损伤性能提出了更高的挑战。另一方面, 熔石英的后表面损伤可以通过如  $\text{CO}_2$  激光器的辐照处理进行修复<sup>[61-62]</sup>, 但是紫外氟磷玻璃的丝状损伤是一种体损伤, 一旦形成基本无法修复。因此, 无论从紫外氟磷玻璃所面临更优的抗激光损伤性能需求或更久的元件使用寿命两个方面考虑, 未来亟需解决玻璃的体内成丝损伤问题。

#### 4 紫外氟磷玻璃的发展方向

紫外氟磷玻璃兼具高的紫外透过及高的紫外激光损伤阈值,在ICF领域具有一定的应用潜力。目前系统地研究了玻璃的激光损伤机理以及激光损伤阈值提升途径,研究成果可为进一步提升玻璃的抗激光损伤性能,进而推动该系列高损伤阈值强激光玻璃在ICF装置中的工程应用指明了发展方向。

首先,在 高能激光诱导氟磷玻璃的发光方面,可对玻璃的发光能量进行量化,结合玻璃对入射激光的吸收系数,便能够对沉积在玻璃体内的热能进行量化,“定性”与“定量”并举,进一步阐明高能激光诱导氟磷玻璃发光-玻璃的高损伤阈值特性之间的内在联系,更高层次揭示材料的激光损伤机理。其次,在氟磷玻璃的抗激光损伤性能提升方面,对高能激光诱导紫外氟磷玻璃的损伤研究过程中发现了丝状损伤,表明因玻璃非线性折射率高而引起的成丝损伤是限制玻璃抗激光损伤性能进一步提升的一个关键因素。因此,降低玻璃的非线性折射率,以进一步提升氟磷玻璃的抗激光损伤性能是未来可针对拓展紫外氟磷玻璃性能的发展方向之一。

#### 5 结 论

本文从 ICF 终端光学组件中熔石英的损伤以及 ICF 装置输出能量提升和平稳运行对新型紫外光学玻璃的应用需求出发,论述了中国科学院西安光学精密机械研究所研制兼具高紫外透过和高抗损伤性能的紫外氟磷玻璃的应用潜力。通过调整配方组成、熔制温度和退火精度来调控玻璃中的微观缺陷研究,证实了这些方法对提升紫外氟磷玻璃抗激光损伤性能的有效性。但是,由非线性自聚焦效应引起的体内成丝损伤问题,是下一步提升玻璃抗损伤性能需要重点解决的问题。

#### 参考文献:

- [1] Nuckolls J, Wood L, Thiessen A, et al. Laser compression of matter to super-high densities: thermonuclear (CTR) applications[J]. *Nature*, 1972, 239(5368): 139-142.
- [2] Hora H, Schwarz H J. Laser interaction and related plasma phenomena (Report on the 4th International Workshop, Troy, 1976)[J]. *Nuclear Fusion*, 1977, 17(1): 165-170.
- [3] 王淦昌. 激光惯性约束核聚变(ICF)最新进展综述[J]. *核科学与工程*, 1997, 17(3): 266-269. (Wang Ganchang. A brief review of the progress of laser inertial confinement fusion in recent years[J]. *Chinese Journal of Nuclear Science and Engineering*, 1997, 17(3): 266-269)
- [4] Basov N G. Progress and prospect of laser thermonuclear fusion[J]. *Kvantovaya Elektronika*, 1993, 20: 305-309.
- [5] Nakai S, Mima K. Laser driven inertial fusion energy: present and prospective[J]. *Reports on Progress in Physics*, 2004, 67(3): 321-349.
- [6] Bodner S E, Colombant D G, Gardner J H, et al. Direct-drive laser fusion: status and prospects[J]. *Physics of Plasmas*, 1998, 5(5): 1901-1918.
- [7] 范滇元, 贺贤土. 惯性约束聚变能源与激光驱动器[J]. *大自然探索*, 1999, 18(1): 31-35. (Fan Dianyuan, He Xiantu. Inertial confinement fusion energy and laser driver[J]. *Discovery of Nature*, 1999, 18(1): 31-35)
- [8] Moses E I, Campbell J H, Stolz C J, et al. The National Ignition Facility: the world's largest optics and laser system[C]//*Proceedings of SPIE 5001, Optical Engineering at the Lawrence Livermore National Laboratory*. 2003: 500351.
- [9] Spaeth M L, Manes K R, Bowers M, et al. National Ignition Facility laser system performance[J]. *Fusion Science and Technology*, 2016, 69(1): 366-394.
- [10] Haynam C A, Wegner P J, Auerbach J M, et al. National ignition facility laser performance status[J]. *Applied Optics*, 2007, 46(16): 3276-3303.
- [11] Fusion news ignites optimism[J]. *Nature Photonics*, 2021, 15: 713.
- [12] 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.
- [13] Spaeth M L, Mane K R, Kalantar D H, et al. Description of the NIF laser[J]. *Fusion Science and Technology*, 2016, 69(1): 25-145.
- [14] Néauport J, Journot E, Gaborit G, et al. Design, optical characterization, and operation of large transmission gratings for the laser integration line and Laser Megajoule facilities[J]. *Applied Optics*, 2005, 44(16): 3143-3152.
- [15] de Yoreo J J, Burnham A K, Whitman P K. Developing  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  and  $\text{KD}_2\text{PO}_4$  crystals for the world's most power laser[J]. *International Materials Reviews*, 2002, 47(3): 113-152.
- [16] Wegner P J, Hennesian M A, Speck D R. Harmonic conversion of large-aperture 1.05- $\mu\text{m}$  laser beams for inertial-confinement fusion research[J]. *Applied Optics*, 1992, 31(30): 6414-6426.
- [17] Zheng Wanguo, Wei Xiaofeng, Zhu Qihua, et al. Laser performance of the SG-III laser facility[J]. *High Power Laser Science and Engineering*, 2016, 4: e21.

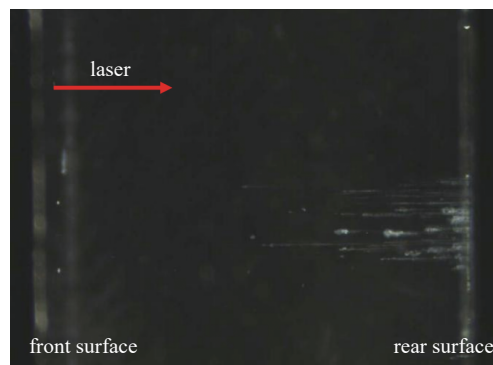


Fig. 8 351 nm laser-induced damage of UV fluorophosphate glass

图 8 紫外氟磷玻璃的 351 nm 激光损伤<sup>[51]</sup>

- [18] Wang Zhuo, Wang Lin, Peng Wenqiang, et al. Origin and distribution of redeposition layer in polished fused silica[J]. *Optical Engineering*, 2015, 54: 085102.
- [19] Cheng Jian, Wang Jinghe, Hou Jing, et al. Effect of polishing-induced subsurface impurity defects on laser damage resistance of fused silica optics and their removal with HF acid etching[J]. *Applied Sciences*, 2017, 7: 838.
- [20] Liu Hongjie, Wang Fengrui, Huang Jin, et al. Experimental study of 355 nm laser damage ignited by Fe and Ce impurities on fused silica surface[J]. *Optical Materials*, 2019, 95: 109231.
- [21] Li Bo, Hou Chunyuan, Tian Chengxiang, et al. Layer by layer exposure of subsurface defects and laser-induced damage mechanism of fused silica[J]. *Applied Surface Science*, 2020, 508: 145186.
- [22] Jiang Yong, Zhang Binjie, Liu Hufeng, et al. Light field modulation of ejected SiO<sub>2</sub> particles on fused silica surface[J]. *The European Physical Journal D*, 2021, 75: 282.
- [23] 刘娅丽, 戚磊, 郑梦珂, 等. 划痕缺陷对熔融石英光诱导损伤特性的影响分析[J]. *物理学报*, 2021, 70: 134203. (Liu Yali, Qi Lei, Zheng Mengke, et al. Effect of scratch defects on photoinduced damage characteristics of fused quartz[J]. *Acta Physica Sinica*, 2021, 70: 134203)
- [24] Fournier J, Néauport J, Grua P, et al. Evidence of a green luminescence band related to surface flaws in high purity silica glass[J]. *Optics Express*, 2010, 18(21): 21557-21566.
- [25] Fournier J, Neauport J, Grua P, et al. Green luminescence in silica glass: a possible indicator of subsurface fracture[J]. *Applied Physics Letter*, 2012, 100: 114103.
- [26] Köhler R, Gerhard C. XPS analysis of metallic trace contaminations on fused silica surfaces induced by classical optics manufacturing[J]. *Optical Materials Express*, 2021, 11(11): 3844-3853.
- [27] Li Yaguo, Yuan Zhigang, Wang Jian, et al. Laser-induced damage characteristics in fused silica surface due to mechanical and chemical defects during manufacturing processes[J]. *Optics & Laser Technology*, 2017, 91: 149-158.
- [28] Ye Hui, Li Yaguo, Xu Qiao, et al. Resistance of scratched fused silica surface to UV laser induced damage[J]. *Scientific Reports*, 2019, 9: 10741.
- [29] Wang Hongyu, Xiang Sunlin, Xiong Baoxing, et al. The light modulation of scratches on the surface of fused silica glass[C]//Proceedings of SPIE 11717, 24th National Laser Conference & Fifteenth National Conference on Laser Technology and Optoelectronics. 2020: 117172R.
- [30] Pile D F P. Redlining lasers for nuclear fusion[J]. *Nature Photonics*, 2021, 15(12): 863-865.
- [31] Ye Hui, Li Yaguo, Xu Qiao, et al. Effects of wet chemical etching on scratch morphology and laser damage resistance of fused silica[J]. *Silicon*, 2020, 12(2): 425-432.
- [32] Shao Ting, Shi Zhaohua, Sun Laixi, et al. Role of each step in the combined treatment of reactive ion etching and dynamic chemical etching for improving the laser-induced damage resistance of fused silica[J]. *Optics Express*, 2021, 29(8): 12365-12380.
- [33] Sun Laixi, Huang Jin, Shao Ting, et al. Effects of combined process of reactive ion etching and dynamic chemical etching on UV laser damage resistance and surface quality of fused silica optics[J]. *Optics Express*, 2018, 26(14): 18006-18018.
- [34] He Xiang, Cai Chao, Zhao Heng, et al. Effect of ion beam etching on surface/subsurface structural defect evolution in fused silica optics[J]. *Optical Materials*, 2021, 116: 111096.
- [35] Catrin R, Neauport J, Taroux D, et al. Magnetorheological finishing for removing surface and subsurface defects of fused silica optics[J]. *Optical Engineering*, 2014, 53: 092010.
- [36] Doualle T, Gallais L, Cormont P, et al. Effect of annealing on the laser induced damage of polished and CO<sub>2</sub> laser-processed fused silica surfaces[J]. *Journal of Applied Physics*, 2016, 119: 213106.
- [37] Cao Zhen, Wei Chaoyang, Cheng Xin, et al. Ground fused silica processed by combined chemical etching and CO<sub>2</sub> laser polishing with super-smooth surface and high damage resistance[J]. *Optics Letters*, 2020, 45(21): 6014-6017.
- [38] Tsujibayashi T, Toyoda K, Sakuragi S, et al. Spectral profile of the two-photon absorption coefficients in CaF<sub>2</sub> and BaF<sub>2</sub>[J]. *Applied Physics Letters*, 2002, 80(16): 2883-2885.
- [39] Su Liangbi, Dong Yongjun, Yang Weiqiao, et al. Growth, characterization and optical quality of CaF<sub>2</sub> single crystals grown by the temperature gradient technique[J]. *Materials Research Bulletin*, 2005, 40(4): 619-628.
- [40] Li Chunhong, Kang Xiaoli, Han Wei, et al. Nanosecond laser-induced surface damage and material failure mechanism of single crystal CaF<sub>2</sub> (111) at 355 nm[J]. *Applied Surface Science*, 2019, 480: 1070-1077.
- [41] He Dongbing, Kang Shuai, Zhang Liyan, et al. Research and development of new neodymium laser glasses[J]. *High Power Laser Science and Engineering*, 2017, 5: e1.
- [42] 胡丽丽, 陈树彬, 孟涛, 等. 大口径高性能激光钕玻璃研究进展[J]. *强激光与粒子束*, 2011, 23(10): 2560-2564. (Hu Lili, Chen Shubin, Meng Tao, et al. Advances in high performance large aperture neodymium laser glasses[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2011, 23(10): 2560-2564)
- [43] 韩勛, 张海潮, 刘峻, 等. 透紫外、高应变点磷酸盐光学玻璃的研究进展和应用[J]. *中国建材科技*, 2021, 30(6): 47-50. (Han Xu, Zhang Haichao, Liu Jun, et al. Research progress and application of ultraviolet transparent and high strain point phosphate optical glass[J]. *China Building Materials Science & Technology*, 2021, 30(6): 47-50)
- [44] Wang Pengfei, Lu Min, Gao Fei, et al. Luminescence in the fluoride-containing phosphate-based glasses: a possible origin of their high resistance to nanosecond pulse laser-induced damage[J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 8593.
- [45] 陈猛, 向霞, 蒋勇, 等. 酸蚀与紫外激光预处理结合提高熔石英损伤阈值[J]. *强激光与粒子束*, 2010, 22(6): 1383-1387. (Chen Meng, Xiang Xia, Jiang

- Yong, et al. Enhancement of laser induced damage threshold of fused silica by acid etching combined with UV laser conditioning[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2010, 22(6): 1383-1387)
- [46] 贺全龙. 高能辐照诱导氟磷酸盐玻璃的损伤机理研究[D]. 西安: 中国科学院大学(中国科学院西安光学精密机械研究所), 2019. (He Quanlong. The research on the damage mechanism of fluorophosphate glass induced by high energy irradiation[D]. Xi'an: University of Chinese Academy of Sciences (Xi'an Institute of Optics Precision Mechanics of CAS), 2019)
- [47] He Quanlong, Wang Pengfei, Lu Min, et al. Investigations on the photoluminescence of the iron and cobalt doped fluoride-containing phosphate-based glasses and its defects-related nature[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2016, 685: 153-158.
- [48] Feng Dandan, He Quanlong, Lu Min, et al. Investigations on the photoluminescence spectra and its defect-related nature for the ultraviolet transmitting fluoride-containing phosphate-based glasses[J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2015, 425: 130-137.
- [49] He Quanlong, Wang Pengfei, Sun Mengya, et al. Effects of doping B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> on the defects-state in SiO<sub>2</sub>-containing phosphate based glasses[J]. *Optical Materials Express*, 2017, 7(8): 2697-2705.
- [50] Wang Pengfei, He Quanlong, Lu Min, et al. Evolutionary mechanism of the defects in the fluoride-containing phosphate based glasses induced by gamma radiation[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 18926.
- [51] 侯超奇. 高损伤阈值氟磷酸盐玻璃的研究[D]. 西安: 中国科学院研究生院(西安光学精密机械研究所), 2014. (Hou Chaoqi. Study of fluorophosphate glass with high laser induced damage threshold[D]. Xi'an: University of Chinese Academy of Sciences (Xi'an Institute of Optics Precision Mechanics of CAS), 2014)
- [52] Li Shengwu, Wan Rui, Ma Yuan, et al. Enhancement of UV laser-induced damage resistance of the fluoride-containing phosphate glasses by regulating the intrinsic defects[J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 2022, 105(4): 2546-2555.
- [53] Demos S G, Hoffman B N, Carr C W, et al. Mechanisms of laser-induced damage in absorbing glasses with nanosecond pulses[J]. *Optics Express*, 2019, 27(7): 9975-9986.
- [54] Shen Hong, Wang Han, Tian Chenyun. Heat accumulation in ultrafast laser scanning of fused silica[J]. *Journal of Heat Transfer*, 2021, 143: 022102.
- [55] Marks M R, Cheong K Y, Hassan Z. A review of laser ablation and dicing of Si wafers[J]. *Precision Engineering*, 2022, 73: 377-408.
- [56] Naseri N, Dupras G, Ramunno L. Mechanism of laser induced filamentation in dielectrics[J]. *Optics Express*, 2020, 28(18): 26977-26988.
- [57] Li Shengwu, Yang Yanqiang, Song Yunfei, et al. Laser-induced fluorescence and its effect on the damage resistance of fluoride-containing phosphate-based glasses[J]. *Ceramics International*, 2021, 47(9): 13164-13172.
- [58] Wong J, Ferriera J L, Lindsey E F, et al. Morphology and microstructure in fused silica induced by high fluence ultraviolet 3 $\omega$  (355 nm) laser pulses[J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2006, 352(3): 255-272.
- [59] Cheng Qiang, Huang Jin, Zhou Xinda, et al. Comparison of fused silica and oxyfluoride glass on laser induced initial damage morphology[C]//Proceedings of SPIE 8786, Pacific Rim Laser Damage 2013: Optical Materials for High Power Lasers. 2013: 878604.
- [60] DeSalvo R, Said A A, Hagan D J, et al. Infrared to ultraviolet measurements of two-photon absorption and  $n_2$  in wide bandgap solids[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1996, 32(8): 1324-1333.
- [61] 罗成思, 袁晓东, 刘春明, 等. CO<sub>2</sub>激光对熔石英损伤修复的研究进展[J]. 材料导报, 2011, 25(19): 118-122. (Luo Chengsi, Yuan Xiaodong, Liu Chunming, et al. Research development of CO<sub>2</sub> laser treatment for repair damage in fused silica[J]. *Materials Reports*, 2011, 25(19): 118-122)
- [62] Cormont P, Gallais L, Lamaignère L, et al. Impact of two CO<sub>2</sub> laser heatings for damage repairing on fused silica surface[J]. *Optics Express*, 2010, 18(25): 26068-26076.