

液晶光学器件的近红外激光损伤研究进展

刘晓凤^{1,2,3}, 彭丽萍^{2,3,4}, 赵元安^{2,3,5*}, 王玺¹, 李大伟^{2,3}, 邵建达^{2,3**}

¹国防科技大学脉冲功率激光技术国家重点实验室, 安徽 合肥 230037;

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中国科学院强激光材料重点实验室, 上海 201800;

⁴中国科学院大学材料与光电研究中心, 北京 100049;

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

摘要 液晶光学器件在激光聚变、光电对抗、激光雷达、激光通信等领域的应用面临着近红外高功率激光辐照失效的风险。在介绍液晶光学器件基本结构和基本工作原理的基础上, 按照液晶光学器件的组成, 依次对构成液晶光学器件的导电膜、取向膜、液晶材料, 以及整体液晶光学器件在近红外激光辐照下的损伤特性及机制的研究进展进行了综述。

关键词 激光光学; 激光损伤; 液晶光学器件; 导电膜; 取向膜; 液晶材料

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202047.0100002

Research Progress on Near-Infrared High-Power Laser Damage of Liquid Crystal Optical Devices

Liu Xiaofeng^{1,2,3}, Peng Liping^{2,3,4}, Zhao Yuanan^{2,3,5*}, Wang Xi¹,

Li Dawei^{2,3}, Shao Jianda^{2,3**}

¹State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology, National University of Defense Technology, Hefei, Anhui 230037, China;

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

³Key Laboratory of Materials for High Power Laser, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

⁴Center of Materials Science and Optoelectronics Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

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

Abstract The liquid crystal optical devices that are used in fusion ignition, optoelectronic countermeasure, laser radar, and laser communication encounter a performance failure that can be attributed to the near-infrared high-power laser irradiation. In this study, the basic constituent components and working principle of the liquid crystal optical devices are initially introduced. Subsequently, the laser damage characteristics and mechanisms of the conductive film, alignment film, and liquid crystal material, which are the main constituent components of the liquid crystal optical devices, are reviewed. Finally, the laser damage characteristics and mechanisms of the whole liquid crystal optical under the radiation of near-infrared laser are summarized.

Key words laser optics; laser damage; liquid crystal optical devices; conductive film; alignment film; liquid crystal material

OCIS codes 140.3330; 160.3710; 310.7005

收稿日期: 2019-06-18; 修回日期: 2019-08-16; 录用日期: 2019-10-09

基金项目: 国家自然科学基金(11874369, 11774319)、脉冲功率激光技术国家重点实验室开放基金

* E-mail: yazhao@siom.ac.cn; ** E-mail: jdshao@mail.shcnc.ac.cn

1 引 言

液晶是介于各项异性晶体与各项同性液体之间的一种中介物,既具有液体的流动性,也具有晶体的各项异性。由于液晶具有流动性和各项异性,所以当外场(磁场、电场、温度场或光场)被施加于液晶光学器件时,液晶分子的方向在外场的作用下易被改变,导致液晶的光学性质发生变化,从而使得液晶光学器件可以实现对光束振幅、相位、偏振、指向的调节。液晶光学器件具有空间分辨率高、可主动调控、快速响应、成本低、可填充成各种形状以及使用方便等其他光调制器所不具备的优势,在光束空间整形^[1-2]、光谱滤波^[3]、偏振调节^[4]、动态全息^[5-6]、自适应光学^[7-8]、光束偏转^[9-11]等方面得到了广泛研究和应用。目前,受液晶材料自身吸收特性^[12]及双折射特性^[13]的限制,大部分液晶光学器件还主要工作在低功率密度和低通量条件下的可见光和近红外波段,而其在激光聚变、光电对抗、激光雷达、激光通信等领域的应用面临着近红外高功率激光辐照失效的风险^[1,14-17]。吸收导致的热效应和损伤问题是液晶光学器件在近红外高功率激光系统中应用时遇到的主要问题之一。找到限制液晶光学器件在高功率激光系统中稳定应用的关键瓶颈,明确液晶光学器件工艺优化的方向,需要厘清激光能量在液晶光学器件各层材料间沉积、传导、耦合的过程及特性。尽管国内外相关研究机构已经对整体液晶光学器件以及构成液晶光学器件的关键材料进行了激光加载效应研究,但是目前从器件整体角度系统分析器件性能失效与其构成材料之间关联特性的研究仍比较缺乏。

针对液晶光学器件在近红外高功率激光系统中的应用需求,本文对近红外高功率激光辐照下液晶光学器件相关特性的研究进展进行了归纳总结。首先对液晶光学器件的基本结构和工作原理进行了简要介绍,接着依据器件的基本结构介绍了构成器件的透明导电膜、取向膜、液晶材料激光损伤的研究进展,然后介绍了整体液晶光学器件在近红外高功率激光辐照下的性能退化及损伤现象,并总结了提高液晶光学器件抗激光损伤能力的方法,最后结合研究现状指出了目前液晶光学器件的高功率激光辐照研究还需进一步开展的一些工作。

2 液晶光学器件的构成及基本工作原理

典型的液晶光学器件由透明导电膜、取向膜、液

晶材料以及玻璃基底四部分组成,如图 1 所示,常为“三明治”对称结构,透明导电膜镀制于玻璃基底上,取向膜旋涂于透明导电膜上,中间是液晶层。透明导电膜作为液晶光学器件的导电电极,用于加载电压;取向膜经摩擦取向或者光控取向,就可实现对液晶分子初始排列方向和角度的调控^[18];液晶分子成扁平碟子状,其指向矢量通常为液晶分子长轴的方向,光学上类似单轴晶体,具有各向异性,光轴沿其长轴方向。当入射光沿着液晶分子长轴方向入射到液晶分子时,光线的传播方向不改变,不会出现双折射现象。但当入射光的方向与液晶分子长轴方向不同时,液晶分子会对经过它的光产生双折射,出射时会产生偏振方向互相垂直的两束折射光线:一束折射光线的振动方向垂直于光线与液晶分子长轴组成的入射面,折射行为遵循光的折射定律,称之为寻常光(o),即不论入射光线方向如何,折射光线总在入射面内,且折射率 n_o 不发生改变;一束折射光线的振动方向平行于光线与液晶分子长轴组成的入射面,折射行为不遵循折射定律,其折射率 $n(\theta)$ 随着光线与光轴的夹角改变,被称为非寻常(e)光^[19]。

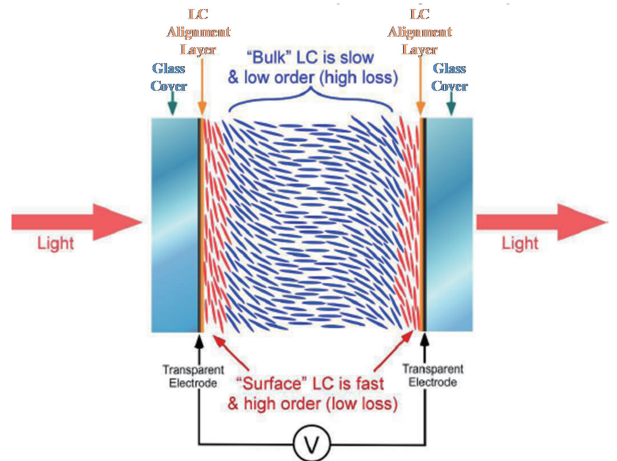


图 1 液晶光学器件的基本结构^[20]

Fig. 1 Basic structure of liquid crystal optical device^[20]

液晶分子在施加电压的情况下会发生转动,假设液晶分子在外电场的作用下转动了 θ 角度,如图 2 所示,此时液晶分子对寻常光的折射率 n_o 不变,其在大小上等于液晶分子短轴方向的折射率。液晶分子对非寻常光的折射率为

$$n(\theta) = \frac{n_o n_e}{\sqrt{n_o^2 \cos^2 \theta + n_e^2 \sin^2 \theta}}, \quad (1)$$

式中: n_e 为液晶分子长轴方向的折射率。不同的电压使液晶分子的转动角度不同,导致非寻常光折射率 $n(\theta)$ 改变,从而改变非寻常光的相位延迟特性。

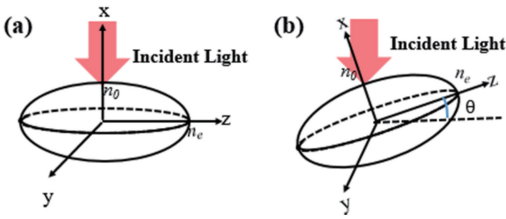


图 2 液晶分子转动示意图^[21]。(a)不加电压;(b)加电压
Fig. 2 Diagrams of liquid crystal molecule rotation^[21].
(a) No voltage is applied; (b) voltage is applied

以应用比较普遍的平行相列液晶为例,当入射光为偏振光,且偏振方向平行于入射方向和液晶分子长轴组成的平面时,会对入射线偏振光产生纯相位调制,此时只有非寻常光,没有寻常光^[22-23]。如果该液晶光学器件液晶层的总厚度为 d ,入射偏振光束通过该液晶光学器件的相位延迟为

$$\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \int_{-d/2}^{d/2} [n(\theta) - n_o] dz, \quad (2)$$

式中: λ 为入射激光波长。当入射光偏振方向介于液晶分子的长轴和短轴之间时,非寻常光相位的变化既带来振幅变化,也会使出射光的偏振态发生改变^[22];当液晶层对上述入射偏振光的相位调制呈周期性改变的斜波时,液晶光学器件等效为闪耀光栅,宏观上就会引起光束指向的偏转^[24]。可见,液晶光学器件对入射光束振幅、相位、偏振、指向的调节,在本质上都是液晶分子对非寻常光束相位的调节。

3 液晶光学器件的激光辐照效应

在低功率激光辐照下,液晶光学器件吸收的热量不足以影响液晶光学器件的性能,而液晶光学器件在近红外高功率激光系统中的应用必须要考虑液晶光学器件的激光耐受能力。国内外多家研究机构对液晶光学器件的抗激光损伤能力进行了探索性研究,研究结果表明:液晶光学器件在 1064 nm 波段高功率纳秒脉冲激光辐照下的抗激光损伤能力仅为 $2 \sim 3 \text{ J/cm}^2$ ^[25],甚至低至数百 mJ/cm^2 ^[26-27]。在 1083 nm 高平均功率连续激光辐照下,液晶光学器件的相位调控能力在辐照激光功率密度超过 102 W/cm^2 时就会受到影响^[28]。上述结果说明液晶光学器件还不能满足在近红外高功率激光系统中的应用需求,从而促使科研人员开始关注液晶光学器件的损伤问题,他们希望通过深入分析液晶光学器件的损伤特性与机制,指导液晶光学器件的工艺优化,进而拓展其在近红外高功率激光系统中的应用。液晶光学器件由多层材料构成,各层材料的激

光损伤特性及机制均会影响液晶光学器件在激光辐照下的性能,是分析能量在整体液晶光学器件上沉积特性及机制的数据支撑和理论基础,所以本章节首先对构成液晶光学器件各层材料的激光损伤特性进行介绍,然后通过对整体液晶光学器件激光损伤特性相关研究的分析阐述,进一步阐明影响不同激光参数下液晶光学器件损伤的可能的材料学因素。

3.1 透明导电膜的激光损伤特性研究

氧化铟锡(ITO)薄膜具有较低的电阻率(可达 $10^{-4} \text{ } \Omega \cdot \text{cm}$ 量级)和较高的透过率(可见光和近红外光的透过率可高达 90%),是目前综合性能最优异的透明导电薄膜,已被大量用于制作液晶光学器件的透明导电电极。本文的透明导电膜主要是指 ITO 薄膜。

通常情况下,透明导电膜的吸收较大,抗激光损伤能力较差。ITO 薄膜的抗激光损伤能力与制备该薄膜的工艺参数有密切关联,国内外相关研究机构对膜层厚度、沉积温度、基底材料、保护层等对 ITO 薄膜在高峰值功率脉冲激光下抗激光损伤能力的影响进行了深入研究。

中国工程物理研究院流体物理所的 Wang 等^[29]研究了厚度对 ITO 薄膜抗激光损伤能力的影响,实验表明,ITO 薄膜的 1064 nm 纳秒(10 ns)单脉冲激光损伤阈值随其厚度的增加而降低,如图 3 所示。作者认为这与 ITO 薄膜的电场分布、热导率(膜层越厚热导率越大,表面温度越低)、内应力和结构缺陷密度无关,而与其微观结构有关,微观结构影响了 ITO 薄膜的载流子密度。不同厚度 ITO 薄膜的载流子密度及迁移率如表 1 所示,微观结构如图 4(a)所示。可以看出膜层越厚,(222)晶向对应的峰值强度和半峰全宽越低,意味着膜层越厚,晶粒尺寸越大,晶界密度越低。而晶界是自由载流子的陷阱,是自由载流子传输的障碍,所以随着膜层厚度增加,晶界减少,ITO 薄膜中的自由载流子密度和自由载流子的迁移率越大^[30]。自由载流子密度越大意味着 ITO 薄膜的等离子体共振波长越短,透过率窗口越窄[图 4(b)],等离子共振吸收越大。对于透明导电膜,当入射激光波长偏离等离子共振波长时,吸收率直接正比于载流子密度。对于较厚的 ITO 薄膜,其载流子密度较大,所以在 1064 nm 波段的吸收率较大,这是导致较厚 ITO 薄膜的 1064 nm 激光损伤阈值比较低的主要原因。在薄膜镀制过程中,通过低温沉积较厚的 ITO 薄膜,可以同时实现厚膜载流子密度降低和载流子迁移率的增加,从而

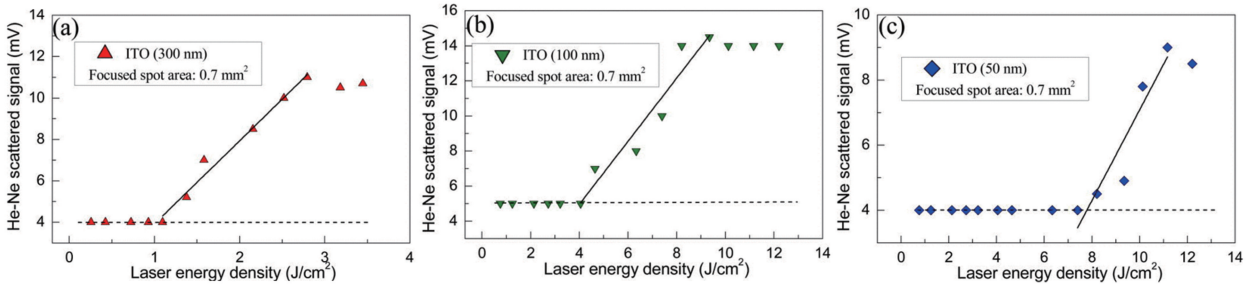


图3 不同厚度 ITO 薄膜的损伤阈值^[29]。(a) 300 nm;(b) 100 nm;(c) 50 nm

Fig. 3 Laser induced damage thresholds of ITO films with different thicknesses^[29].

(a) 300 nm; (b) 100 nm; (c) 50 nm

表 1 不同厚度 ITO 薄膜的载流子密度和载流子迁移率^[29]

Table 1 Carrier density and carrier mobility of ITO films with different thicknesses^[29]

Thickness /nm	Carrier density /cm ⁻³	Carrier mobility / (cm ² ·V ⁻¹ ·s ⁻¹)
300	5.0×10 ²⁰	23.21
100	3.2×10 ²⁰	22.98
50	1.2×10 ²⁰	22.00

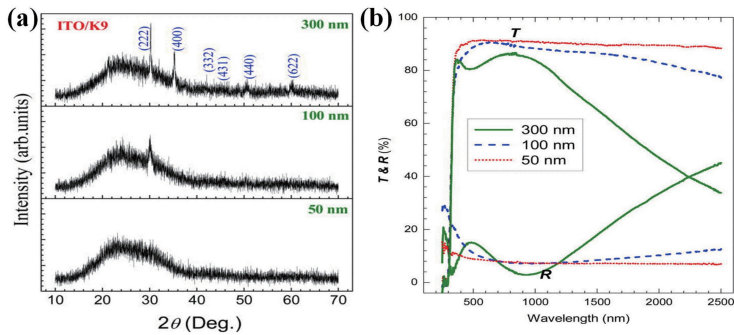


图4 不同厚度 ITO 薄膜的微观结构和光谱^[29]。(a) 微观结构;(b) 光谱

Fig. 4 Microstructures and spectra of ITO films with different thicknesses^[29]. (a) Microstructures; (b) spectra

达到在不影响厚膜电导率的前提下改善其抗激光损伤能力的目的^[31]。

损伤特性的细致表征与分析可以为工艺的优化提供明确的指导方向。美国劳伦斯利弗莫尔国家实验室的 Yoo 等^[32-33]基于 ITO 薄膜的脉冲激光损伤表现出的明显的热衰退现象,认为热扩散系数较大的基底以及热导率较大的保护层可以提高 ITO 薄膜的抗激光损伤能力。

Yoo 等^[32]的研究表明 ITO 薄膜的 1064 nm 纳秒(9 ns)脉冲激光损伤可以分为三个阶段,如图 5 所示:第一个阶段观察不到明显的损伤,也探测不到明显的光致发光谱;第二个阶段出现了明显的热衰退现象,热力驱动过程发生,这一过程包含应力裂纹导致的变暗、熔融、再凝固,以及最终的蒸发、移除;第三个阶段,在损伤区域产生了等离子体,使得损伤区域超过光束口径,并伴随着 ITO 碎片的再沉积,损伤区域出现了纳米量级粒子和聚集物的沉积,但

可能是由于等离子体的屏蔽,损伤的横向尺寸最终稳定在 1 mm 左右,如图 5 所示。

图 5 中 4.5 J/cm² 能量密度激光辐照下产生的变暗损伤的具体细节信息如图 6 所示,可以看出,损伤的黑化区域存在裂纹。裂纹的产生沿着晶界的边界,作者认为这是由于玻璃基底与 ITO 薄膜之间热膨胀系数的不匹配(玻璃热膨胀系数为 $8.3 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, ITO 热膨胀系数为 $6.7 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$)造成的,或者是纳秒激光辐照下快速的温升诱导的张力造成的。对比图 6(c)的 2~7 图可以看出晶粒的尺寸约增大了 10 倍,且由于熔融和表面传输,表面变得比较光滑。在图 6(c)中的 8~10 图的损伤中心可以看到白色的富含金属的纳米粒子,这可能是由于激光辐照下热力学的亚稳态导致金属相出现了偏析。根据氧化物自由能图和 ITO 相位图,氧化铟(In₂O₃)比氧化锡(SnO₂)稳定,尤其是在高温时,所以作者认为白色纳米粒子是富含 Sn 的纳米粒子。

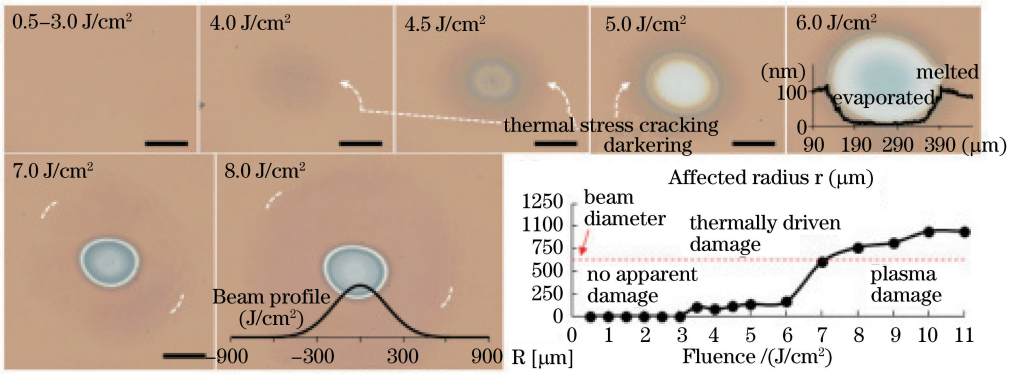


图 5 光学显微镜下观察到的 90 nm ITO 薄膜的表面状态随着激光辐照能量的退化以及损伤尺寸^[32]

Fig. 5 Degeneration of surface state of 90-nm ITO film observed by optical microscope with laser irradiation energy and damage size^[32]

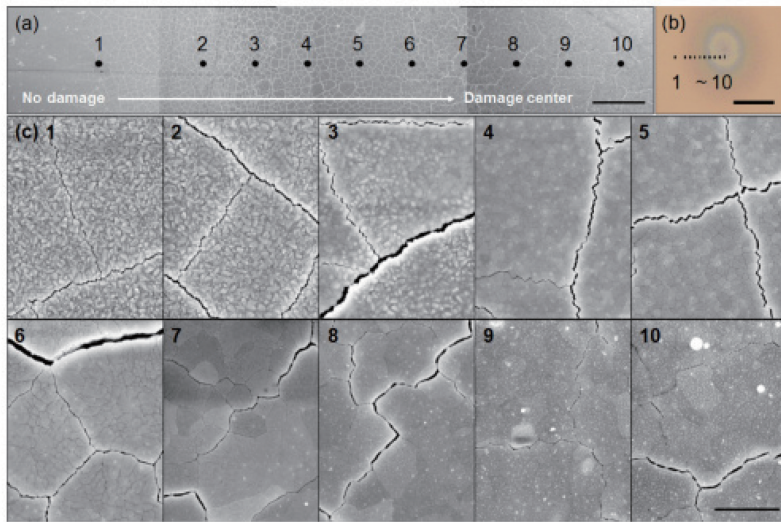


图 6 图 5 中 4.5 J/cm² 能量密度下 ITO 薄膜损伤的扫描电镜图(标尺为 400 nm)^[32]

Fig. 6 Damage of ITO film in Fig. 5 induced by energy density of 4.5 J/cm² observed by scanning electron microscope (the scale bar is 400 nm)^[32]

此外,蒸发的材料也会因冷却而在表面再凝聚,气相变得过饱和,当氧气被移除后,富含金属的粒子可以再沉积。

从上述对 ITO 薄膜损伤特性的详细表征与分析可以看出,在脉冲激光辐照下,ITO 薄膜会呈现出明显的热衰退特性,这意味着可以通过降低激光辐照过程中 ITO 薄膜的温升来提高 ITO 薄膜的激光损伤阈值,所以 Yoo 等^[33]指出利用高热扩散系数的基底或通过 ITO 表面沉积热导率比较大的保护层,可以实现对 ITO 薄膜抗激光损伤能力的改善。Yoo 等采用蓝宝石(Sapphire,热扩散系数为 0.118 cm²/s)、硼硅酸盐玻璃(简称为 D263,热扩散系数为 0.004 cm²/s)、熔石英基底(简称为 FS,热扩散系数为 0.009 cm²/s)、BK7 玻璃(热扩散系数为 0.008 cm²/s)作为基底进行了实验验证,结果表明:

沉积于热扩散率较大的蓝宝石基底上的 ITO 薄膜,其损伤尺寸较小,且具有较高的损伤阈值;D263 基底上的 ITO 薄膜的损伤尺寸略大于 FS 基底上的 ITO 薄膜的损伤尺寸,这与 D263 基底上 ITO 薄膜的吸收略大有关。ITO 薄膜的多脉冲(1000 脉冲)损伤阈值几乎是单脉冲损伤阈值的一半,热扩散系数较大的蓝宝石基底上薄膜的多脉冲损伤阈值是其他基底上薄膜的 2~4 倍。此外,作者还研究了热导率比较大的氧化铝(Al₂O₃)薄膜保护层对 ITO 薄膜抗激光损伤能力的影响,实验结果表明,尽管具有 Al₂O₃ 表面保护层的 ITO 样品的吸收比无保护层 ITO 样品的吸收增加了近 2 倍,但保护层样品的损伤尺寸小于无保护层样品的损伤尺寸,保护层样品的单脉冲损伤阈值比无保护层样品提高了 30%,而多脉冲损伤阈值却降低了 30%左右。作者认为增

加保护层的同时在保护层或者界面处引进了另外一种缺陷,可能是这种缺陷的累积损伤导致具有保护层的 ITO 薄膜的多脉冲激光损伤阈值比较低。

结合上述 ITO 薄膜的热损伤特性,科研人员基于热传导方程以及寿命外推模型进行建模,分析验证了 ITO 薄膜损伤的物理机制^[34]。这个模型假设在辐照区域的温升 ΔT 是均匀的,且辐照过程中辐照区域与其附近膜层的热参数相同,当辐照区域温升达到阈值温度时,ITO 薄膜出现损伤。在不同脉冲宽度的激光辐照下,ITO 薄膜的单脉冲损伤可以表示为

$$F_{th}(1) = \frac{18K\Delta T\tau_p}{R^2\alpha [6\sqrt{D\tau_p}/R^2 - \ln(1 + 6\sqrt{D\tau_p}/R^2)]}, \quad (3)$$

式中: K 为热导率; D 为热扩散系数; R 为膜层厚度; τ_p 为激光脉宽; α 为 ITO 薄膜的吸收系数。由图 7 可以看出:在脉冲宽度大于 10 ps 时,阈值温度选取 ITO 薄膜的融化温度 1800 K,模拟得到的阈值与实验结果吻合得比较好,这与 ITO 薄膜在纳秒脉冲激光辐照下常出现熔融、蒸发现象吻合^[32,35];在脉宽小于 10 ps 时,选取 ITO 薄膜的热应力阈值温度 1000 K,模拟得到的阈值与实验结果吻合得比较好。与根据上述单脉冲激光损伤阈值模型反推出来的损伤机制对应,在 1064 nm 纳秒激光辐照下,ITO 薄膜的多脉冲激光损伤阈值随脉冲数目的变化规律符合基于吸收机制的寿命外推模型^[34,36];1064 nm,10 ps 激光辐照下的多脉冲激光损伤阈值随脉冲数目的变化规律符合基于应力-应变储能机制的寿命外推模型,较薄的 ITO 薄膜也具有较高的损伤阈值,表现出更明显的累积效应^[36]。可见:对于脉冲激光,当辐照激光脉冲大于 10 ps 时,ITO 薄膜的损伤机制与 ITO 薄膜吸收导致的热熔融、热蒸发有关,而当辐照激光脉冲的脉宽更短时,损伤机制与 ITO 薄膜吸收导致的热应力有关。

在实际应用中,脉冲激光的长时间辐照对 ITO 薄膜光学性能和导电性能的影响是必须考虑的问题。研究表明,ITO 薄膜在出现宏观可见的永久性损伤前,其光学性能和导电性能不会随辐照脉冲数的变化而出现退化,但当 ITO 薄膜开始出现如图 5 所示的变暗损伤时,其反射率就开始降低,电阻也开始增大,然而文中并未对反射率变化和电阻增大的具体机制进行说明^[37]。

由上述国内外对 ITO 薄膜在脉冲激光辐照下的损伤研究可以看出,目前关于 ITO 薄膜的脉冲激

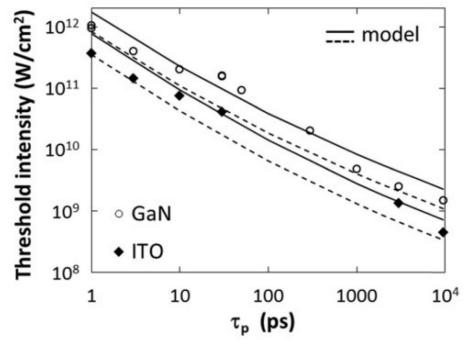


图 7 在不同脉冲宽度的激光辐照下,ITO 薄膜(厚度为 10~100 nm)的单脉冲激光损伤阈值(实线代表选取的阈值温度为 1800 K,虚线代表选取的阈值温度为 1000 K)^[34]

Fig. 7 Laser induced damage thresholds of ITO films (with thickness in the range from 10 nm to 100 nm) irradiated by pulses with different pulse durations (threshold temperature represented by the solid line is 1800 K, and threshold temperature represented by the dotted line is 1000 K)^[34]

光损伤特性与损伤机制、激光损伤阈值提升途径,以及脉冲激光诱导的损伤对其光学性能和电学性能的影响规律比较明晰,但关于热衰退损伤对 ITO 薄膜光学性能和电学性能影响的机制还需进一步研究。

相比于 ITO 薄膜的脉冲激光损伤方面的研究,ITO 薄膜在连续及准连续激光辐照下的研究还不够系统与深入,这与连续及准连续激光辐照诱导的损伤难以表征和观测有关。与脉冲激光损伤不同,在连续及准连续激光辐照下,25 nm 厚 ITO 薄膜的激光损伤虽然肉眼可见,但在光学显微镜下却很难识别^[38]。脉冲激光辐照诱导的损伤是一个快速升温的过程,导致通常看到的都是一个如图 5 所示的显著变化的损伤结果;而连续及准连续激光辐照是一个缓慢升温的过程,导致的是一种缓变的凸起形貌,这种微小的凸起形貌在扫描电镜下也很难区分。ITO 薄膜在连续激光及准连续激光辐照下产生的损伤可以用光学轮廓仪进行识别,其初始损伤形态表现为凸起,凸起的横向尺寸在百微米量级甚至达毫米量级,纵向高度在几十纳米到几微米之间^[38-39]。纵向上纳米至微米量级的微小凸起与高平均功率连续及准连续激光辐照诱导的 ITO 薄膜的温升较低,产生的热应力较小有关^[38]。需要指出的是,光学轮廓仪虽然可以识别上述损伤,但是在纵向高度的评估方面,由于是利用参考光束和测量光束干涉条纹的变化来评估纵向信息,因此会出现无法识别是参考光束还是测量光束先到达 CCD 接收器,从而导致

纵向测量出现凹凸反向的现象;加之受损伤区域的影响,反射的测量光束强度会出现变化,影响干涉条纹的强度信息,导致纵向测量出现误差。

所以,关于 ITO 薄膜的连续及准连续激光损伤研究还亟待寻找一种既可以识别上述损伤又可以准确评估其凸起高度的手段,并在此基础上进行建模分析并验证连续及准连续激光辐照下 ITO 薄膜温升产生的热应力与上述凸起形变的关联,从而提出改善 ITO 薄膜在连续及准连续激光下耐受力的有效方法。

3.2 取向膜的激光损伤研究

聚酰亚胺(PI)具有耐高温、耐化学腐蚀、取向稳定、易成膜、制作成本低等优势,是目前液晶光学器件最常用的取向材料^[40]。PI 薄膜在柔性电子器件领域的应用以及取向膜光控取向技术的发展,使得关于飞秒及紫外波段激光与 PI 薄膜相互作用的研究比较多^[41-43],而关于近红外波段激光与 PI 薄膜相

互作用的报道还比较少。

Du 等^[44]对比研究了 1064 nm 近红外皮秒激光(高斯半径为 15 μm)和 355 nm 紫外皮秒激光(高斯半径为 5 μm)辐照下 PI 薄膜(厚度为 50 μm)的激光损伤特性,结果发现:在 355 nm 紫外皮秒激光辐照下,PI 薄膜的损伤表现为凹陷的同心圆,如图 8(a)~(c)所示;而在 1064 nm 近红外皮秒激光辐照下,PI 薄膜的损伤表现为凸起的带有孔洞的圆盘,如图 8(d)~(f)所示。分析认为,上述形貌上的差异是由于 355 nm 紫外皮秒激光在辐照 PI 薄膜过程中主要发生了光化学效应,而在 1064 nm 近红外皮秒激光辐照过程中主要发生了光热效应。PI 薄膜吸收激光能量会导致 PI 发色团分子被激发到激发态。在光化学过程中,PI 发色团分子化学键在激发电子态直接断裂,而在光热过程中,吸收的激光能量被转化为 PI 发色团分子的振动激发,导致 PI 薄膜温度升高,发生热降解。

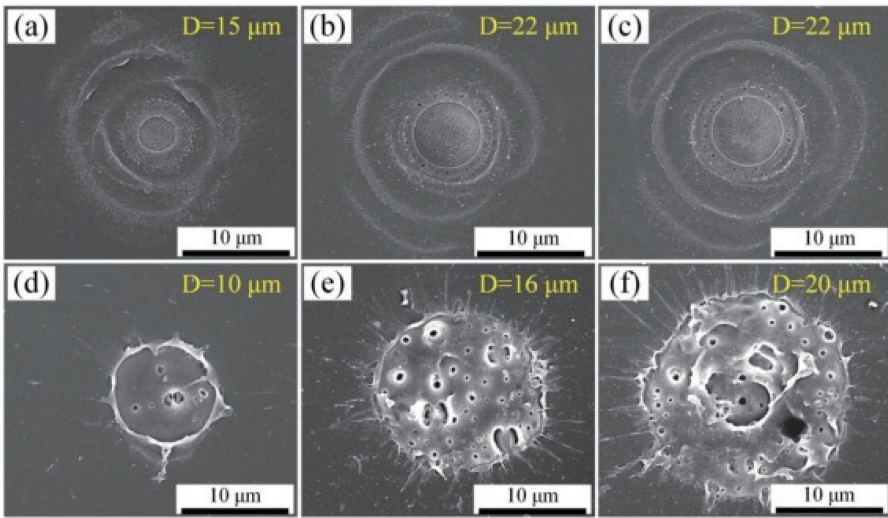


图 8 不同激光辐照下 PI 薄膜的典型损伤形貌。(a)~(c) 355 nm 紫外皮秒激光;(d)~(f) 1064 nm 近红外皮秒激光^[44]

Fig. 8 Typical damage morphologies of PI film under different laser irradiation. (a)~(c) Ultraviolet ps laser with wavelength of 355 nm; (d)~(f) near-infrared ps laser with wavelength of 1064 nm^[44]

Dyer 等^[45]开展了准连续 1064 nm(高斯半径为 3.5 μm)纳秒激光对 PI 薄膜(厚度为 125 μm)的辐照研究,结果如图 9 所示;PI 薄膜在光学轮廓仪下表现为微米量级的小坑,在坑的外围可以看到由径向热流导致材料膨胀;PI 薄膜在光学显微镜下表现为暗区,暗区的横向尺寸随着辐照脉冲数目的增加而增大;在扫描电镜下可以看到坑的外围有凸起的高结构微观结构,作者认为这是由于在扫描电镜的真空环境下热降解过程中释放的气势被捕获后形成的,这意味着准连续近红外纳秒激光辐照下存在大量的热影响区域,准连续近红外纳秒激光诱导 PI

薄膜发生光热效应。此外,通过对激光辐照过程中 PI 薄膜的透过率进行分析后发现,虽然 PI 薄膜在近红外激光辐照下的吸收比较小,但随着辐照脉冲数增加,热降解过程中生成了吸收性的非晶碳,PI 薄膜的吸收会不断增加。Peng 等^[46]通过模仿液晶光学器件的构成,对沉积于 ITO 薄膜(厚度为 25 nm)上的 PI 薄膜(厚度为 80 nm)在 1064 nm 准连续激光(高斯半径为 363 μm)辐照下的损伤特性进行了研究,结果表明,PI 薄膜的损伤在显微镜下表现为表面颜色的变化。作者认为:这种颜色的变化是因为 ITO 薄膜吸收热量导致 PI 升温,使 PI 薄膜

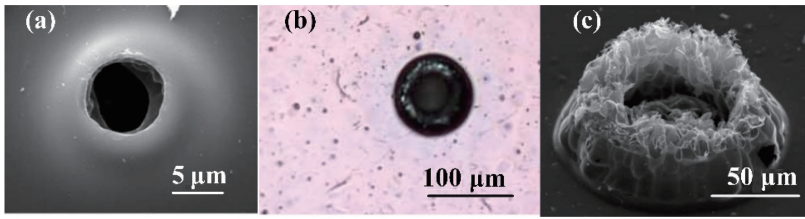


图9 准连续纳秒激光(20 kHz)辐照下,PI薄膜的典型损伤形貌^[45]。(a)光学轮廓仪测试结果(辐照激光参数:20.7 J/cm², 50个脉冲);(b)显微镜测试结果(辐照激光参数:23 J/cm²,500个脉冲);(c)SEM形貌图(辐照激光参数:19 J/cm²,1000个脉冲)
Fig. 9 Typical damage morphologies of PI film irradiated by the quasi-continuous nanosecond laser with the repetition rate of 20 kHz^[45]. (a) Result observed by the white light interferometer (the parameter of the irradiated laser: 20.7 J/cm², 50 pluses); (b) result observed by the microscopy (the parameter of the irradiated laser: 23 J/cm², 500 pluses); (c) result observed by the SEM (the parameter of the irradiated laser: 19 J/cm², 1000 pluses)

发生了热降解;这可能是由于辐照激光单脉冲能量密度较低,产生的热应力较小,因此颜色的变化在纵向上表现为几十纳米的凸起。

可见,构成液晶光学器件的PI取向层在近红外激光辐照下的损伤特性仅与其光热特性有关,激光辐照下PI取向层的温升可以利用热传导温度场模型计算得到。据报道,商业上常用的PI薄膜在近红外波段纳秒脉冲激光辐照下的损伤阈值不超过2 J/cm²(1054 nm,1 ns)^[47],科研工作者一直在不停地寻找具有高的抗激光损伤能力的取向层材料。美国罗切斯特大学在60路OMEGA装置中使用了300多个液晶光学器件,包括液晶波片、液晶偏振片等,这些液晶光学器件工作在1053 nm纳秒脉冲激光下,属于不能对光束参数进行实时动态调节的被动型液晶器件,主要包括取向层、液晶层及玻璃基板三部分,其中抗激光损伤能力最薄弱的取向层采用的是尼龙6/6材料^[48]。尼龙6/6薄膜是将甲酸材料旋涂在玻璃基底上形成的,然后利用工业上常用的力学摩擦方法,采用绒布按照一定的方向摩擦尼龙6/6薄膜,即可以产生沿着摩擦方向排列的密密麻麻的沟槽,形成尼龙6/6取向层。当液晶被灌入并且与尼龙6/6取向层接触时,为了使自身的自由能处在最低、最稳定的状态,长棒状液晶分子会倾向于使其分子长轴沿着尼龙6/6取向层的沟槽方向排列。未摩擦的尼龙6/6薄膜的抗激光损伤能力约为15 J/cm²(1054 nm,1 ns),摩擦过的尼龙6/6取向层的抗激光损伤能力约为9 J/cm²(1054 nm,1 ns)^[27]。基于尼龙6/6材料取向层的部分液晶光学器件服务了15年甚至更长时间,其性能都没有出现退化^[47]。随着取向膜材料及其制备工艺的不断深入研究和优化,研究人员已经成功解决了被动型液晶器件在脉冲高功率激光系统中长时间安全应用

的问题。采用紫外光照射而形成的光控香豆素(coumarin)取向层的抗激光损伤能力可达60 J/cm²(1054 nm,1 ns),基于香豆素光控取向材料所研制的被动型液晶光学器件的激光损伤阈值已经达到了30 J/cm²(1054 nm,1 ns)^[48-49]。

3.3 液晶材料的激光辐照效应

在激光与液晶材料的相互作用方面,液晶材料的非线性效应报道非常多,液晶大量的光学非线性现象在20世纪七八十年代就被发现了^[50-51],而且通过溶解少量的染料就可在液晶液体中获得十倍甚至百倍的非线性加强^[52],这极大地促进了液晶材料的光学非线性响应研究^[53]。对于各向同性液晶,其在1064 nm、30 ps激光辐照下的非线性折射率为CS₂的5%~13%^[54];对于相列液晶,当1064 nm连续激光的辐照功率密度大于300 W/cm²时,热效应导致的自相位调制使得接收白屏上出现了明显的衍射环,而当激光持续作用数百毫秒时,接收屏上的衍射环现象消失^[55];对于胆甾液晶,在近红外波段激光作用下出现了由螺距变化诱导的液晶材料反射的非线性变化现象^[56]。这些奇特的现象实质上都是液晶分子瞬态再取向与热致密度变化、热光效应之间竞争的结果,其中热致密度变化的响应时间非常短(纳秒量级),而热光效应则是慢变过程,往往在微秒量级,甚至更长^[53]。液晶材料巨大的非线性意味着液晶材料的宏观激光损伤比较复杂,除了线性吸收过程,可能还会涉及液晶分子再取向、热致密度变化、热光效应等非线性过程。但是目前液晶材料的宏观损伤研究还仅涉及实验现象的报道,关于宏观损伤的产生与液晶非线性之间的物理关联还不明确。

液晶材料体内的散射通常较大,尤其是对于液晶分子长轴不具有优先取向性的液晶材料,双

折射液晶分子是无序的,会产生巨大的散射,这给损伤的判定带来很大困难,可以考虑采用辐照前后图像相减的方法来解决这一问题,如图 10 所示^[57]。对于液晶材料的激光损伤,低能流激光辐照会引起液晶材料发生气化,导致液晶材料内部产生瞬态的微观气泡,瞬态气泡会对入射光产生散射作用,并在短时间内消失,消失时间与辐照激光能流以及液晶的黏度有关^[52,57];高能流激光辐照会导致液晶材料分解,形成残碳^[4,57]。相比于皮秒激光,在纳秒激光辐照下,通过过滤提纯液晶,移除气泡形成的凝聚中心是非常重要的,其中诱

导损伤的两种可能源头要尽量避免:不溶解的非本征杂质(可以采用离子过滤移除)和本征杂质(通过除气来去除溶解的气态成分,基于色谱分析去除合成的副产品或者催化剂)^[52]。以固定不可逆损伤为标准,对于提纯和除气的各向同性的 5CB 液晶材料,其单脉冲和多脉冲损伤阈值分别为 9.6 J/cm^2 和 4.4 J/cm^2 (1053 nm, 1 ns)^[4],而在相似的状态测试下,5CB 液晶材料在 0.76 J/cm^2 下, E7 液晶在 0.89 J/cm^2 下就会产生瞬态气泡损伤^[52]。目前,关于液晶材料产生上述瞬态气泡及固定损伤的具体物理机制还未见相关报道。

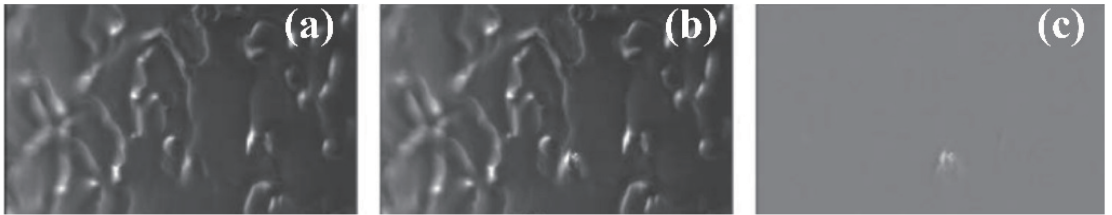


图 10 采用图像相减法判断液晶材料的激光损伤^[57]。(a)激光辐照前;(b)激光辐照后;(c)辐照前后图片相减得到的结果
Fig. 10 Judgment of laser damage of liquid crystal material using image subtraction^[57]. (a) Image before laser irradiation; (b) image after laser irradiation; (c) result that the image before laser irradiation is subtracted from the image after laser irradiation

3.4 液晶光学器件的激光损伤

液晶光学器件的激光损伤涉及激光在各层材料间的沉积、传导及耦合,这意味液晶光学器件的损伤不仅与上述各层材料自身的损伤特性有关,还与辐照激光参数以及器件自身的多层结构有关。

液晶光学器件各组成材料及其整体器件在近红外纳秒脉冲激光(1064 nm, 15 ns)辐照下的抗激光损伤能力如表 2 所示^[25],可以看出 ITO 透明导电层是影响液晶光学器件抗激光损伤能力的薄弱环节,由于 ITO 薄膜吸收激光能量使得其附近的液晶材料受热产生气泡,近阈值激光能流辐照诱导的气泡会随后溶解,而随着辐照能量升高,不可恢复的永久性气泡就会产生,最终造成液晶光学器件性能的衰退,形成残碳。有研究表明,ITO 导电层对近红外飞秒激光(中心波长 $1.55 \mu\text{m}$)的吸收可以补偿液晶自身在近红外波段吸收较弱的特性,诱导普通相列液晶光学器件产生非线性效应,形成全息光栅以及强烈的相位空间自相位调制现象^[58-59]。可见,在高峰值功率脉冲激光作用下,液晶光学器件中 ITO 薄膜的吸收是液晶光学器件发生损伤的关键诱因。ITO 薄膜损伤后其透过率增大,导电性变差。ITO 薄膜透过率增大会导致更多的激光能量进入液晶光学器件中,给液晶光学器件带来更大的温升,而导电性变差会影响加载在液晶分子上的电压,这两方面

均会给液晶光学器件的性能带来不利影响。

表 2 液晶光学器件及其各组成部分的激光损伤阈值^[25]

Liquid crystal modulator element	Laser damage resistance when wavelength is 1064 nm and impulse duration is 15 ns / ($\text{J} \cdot \text{cm}^{-2}$)
Glass substrate (K8)	>16.0
Liquid crystal layer	>16.0
Alignment layer (GeO)	6.9
ITO transparent electrode	2.5-2.9
Liquid crystal modulator with longitudinal electric field	2.5-2.9

中国科学院长春光学精密机械与物理研究所的曹召良等研究了液晶光学器件在 808 nm 高平均连续激光辐照下的性能变化,研究发现:当激光平均功率密度大于 133 W/cm^2 时,液晶光学器件的相位调制特性开始发生,作者认为此时激光辐照诱导的温升达到了液晶材料的清亮点($100 \text{ }^\circ\text{C}$),导致液晶材料发生了热致相变;当激光功率密度从 141 W/cm^2 下降到 133 W/cm^2 及以下时,材料又恢复到液晶态^[60]。美国空军实验室研究了液晶光学器件在 1083 nm 高平均功率连续激光辐照下的相位调控能力变化规律^[28],实验表明:当辐照激光功率密度低于 102 W/cm^2 时,

液晶光学器件的相位调控能力基本不受影响;在辐照激光功率逐渐升高至约 1000 W/cm^2 过程中,液晶光学器件的相位调控深度随辐照激光功率密度的升高而降低。由此可见,液晶光学器件在连续激光下的耐受功率仅约为 100 W/cm^2 。这种液晶光学器件在近红外皮秒准连续激光 (1064 nm , 10 ps , 10 kHz – 2 MHz)下的相位调制深度随着辐照激光功率密度升高而降低的现象也有报道^[61]。

美国空军实验室采用偏光显微镜研究了液晶材料的微观变化与上述相位调制特性的关联^[28]。在辐照激光功率逐渐升高至约 1000 W/cm^2 过程中,可以在正交偏光显微镜下观察到激光辐照产生的热诱导液晶的双折射特性发生了改变,使得液晶内部产生准同心圆干涉。如果在液晶光学器件加载电压时,突然快速关闭激光,这个内部的准同心环缺陷仍然存在。随后,以功率逐渐降低的激光修复液晶器件,发现上述缺陷减少。这些缺陷看起来应该是局

部液晶达到清亮点随后在电信号驱动状态下冷却产生的与电场相关的空域。低功率激光辐照下产生液晶材料的微小迁移。这个迁移在高功率激光多次辐照下或者加热循环后会变得非常明显,如图 11 所示。当激光加热升温时,液晶材料会从器件边缘向中心退回,激光关闭冷却时,液晶又移回到边缘。多次重复这种退回和移回,最终形成了空气空洞。文中认为液晶的运动是由器件边缘隔离垫和密封胶的热胀冷缩造成的。当温度升高时,液晶不如隔离垫和密封胶膨胀得多。在膨胀过程中,隔离垫和密封胶将玻璃推离硅基背板,液晶的体积不足以填充背板与玻璃基板之间的空间,空气从密封胶线上未密封的空隙进入,填充剩下的空间。随后,冷却使隔离垫和密封胶收缩,玻璃基板更靠近背板,这个过程会挤出一些空气,同时也会将空气前面的液晶材料排除。多次热循环导致器件内部的液晶材料越来越少,空气空洞越来越多。

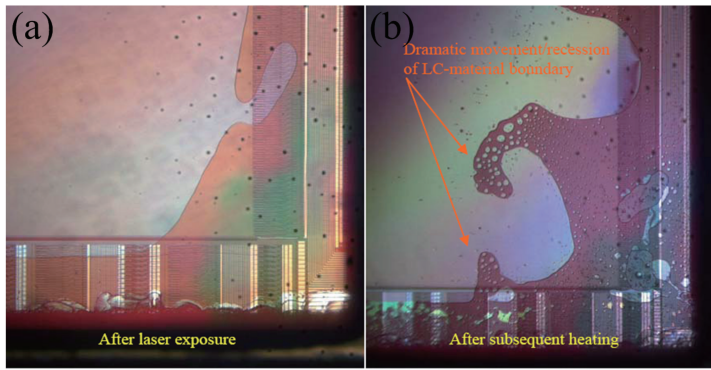


图 11 液晶材料在不同控制方式下的迁移^[28]。(a)在高功率连续激光辐照下;(b)在温度控制仪加热下

Fig. 11 Migration of the liquid crystal material under different control modes^[28].

(a) Under irradiation of high power continuous laser; (b) under heating of temperature controller

对比上述液晶光学器件在高峰值功率脉冲激光和高平均功率连续激光下的损伤现象可以看出,在脉冲激光下,ITO 薄膜首先出现损伤,ITO 薄膜的吸收导致其附近的液晶材料受热产生气泡甚至碳化,而连续激光辐照下,液晶光学器件的相位调制性能会受到影响。这种差异与热量在液晶光学器件中不同的沉积过程有关。取向材料和液晶材料自身的吸收系数较小^[45,53,62-63],透明导电层是激光能量的主要吸收源。在高峰值功率脉冲激光作用下,ITO 薄膜吸收热量产生较大的瞬时温升,热量来不及传导和扩散,导致 ITO 薄膜及其附近的液晶材料首先出现损伤。而在高平均功率连续激光长时间辐照下,ITO 薄膜吸收热量产生的温升较小,且温升过程是一个缓慢变化的过程,使得热量可以传导到整

个液晶光学器件。高平均功率连续激光辐照下液晶光学器件的性能变化可能与液晶材料受热后的温度达到了液晶的清亮点有关^[60],也有可能和液晶器件边缘隔离垫和密封胶膨胀^[28]造成的液晶的迁移有关。目前,对液晶光学器件在连续激光辐照下的损伤研究还不够深入,科研工作者对液晶光学器件在连续激光下相位调制性能退化机制的认识还未统一。

电子科技大学的汪相如课题组^[62-63]建立了连续激光辐照下液晶光学器件的相位调制模型,认为连续激光加载诱导的温升影响了液晶材料自身的物理参数,从而导致了液晶光学器件相位调制性能的退化。ITO 薄膜和 PI 的热特性使得液晶光学器件的温度场分布符合热传导的温度模型。该课题组首先

基于热传导方程的温度场模型获得了激光辐照下器件的温度场分布,模拟表明液晶光学器件在连续激光辐照下的温升只有数十度,这与上述对液晶光学器件在连续激光辐照下的热量沉积过程的论述相吻合;然后结合液晶分子的折射率、倾斜角与温度的关系,分析了激光辐照对液晶分子折射率、倾斜角的影响。对于平行相列器件,利用激光辐照过程中液晶分子的折射率,以及倾斜角数值修正公式中的液晶分子折射率、倾斜角,即可明确激光辐照功率与液晶器件相位调控特性之间的关联,建立连续激光辐照液晶光学器件的相位调制模型。该课题组利用该模型从器件整体吸收率、热沉积结构、冷却流速、基底材料四方面分析了激光加载对液晶光学器件相位调制性能的影响,为液晶光学器件的工艺优化和实际应用提供了参考。

4 液晶光学器件抗激光损伤能力提升的途径

上述液晶光学器件激光损伤的相关研究意味着要想提升液晶光学器件的激光耐受能力必须有效减少热量在液晶光学器件上的沉积。目前,研究人员主要通过优化器件结构、改进器件散热系统、增加辅助散热系统、采用吸收较少的透明导电层材料等手段来有效减少热量在液晶光学器件上的沉积。优化液晶器件结构是行之有效的办法之一。通常,将ITO像素电极分别放于两块玻璃基底上制成导电玻璃,再将两块导电玻璃制成液晶盒,电压施加于上下两层ITO像素电极之间,液晶光学器件工作在横向电场下。有人提出了仅在一块玻璃基底上制备ITO像素电极,电压施加于相邻像素电极,使液晶光学器件工作于纵向电压的方案^[25]。实验结果表明,当液晶光学器件工作在纵向电场下时,液晶光学器件在脉冲激光作用下的激光损伤阈值会有所提高。作者认为液晶光学器件在纵向电场下工作时,光依次经过玻璃、取向层、液晶、取向层、ITO导电层和玻璃,ITO导电层不在强光场区,吸收的激光能量比较小,所以液晶光学器件在脉冲激光下的抗激光损伤能力会提高。相比于石英基底,热传导系数比较大的硅基基底可以增加液晶光学器件的散热,有利用液晶光学器件抗激光损伤能力的提升^[63]。增加辅助散热系统是提升液晶光学器件在高平均功率连续及准连续激光下耐损伤能力的重要途径,其中冷却流速和热沉积结构是提升入射激光功率的两个最重要的因素^[63-65]。汪相如课题组^[64]

研制的以ITO材料为导电层,PI材料为取向层,带有风冷和水冷辅助散热系统的石英基反射式液晶光学器件在1064 nm连续激光辐照下能够耐受功率达272 W/cm²的液晶层,此时温度仅上升10℃左右。透明导电层是液晶光学器件在近红外高功率激光辐照下的主要吸收源,激光耐受力最薄弱,所以对液晶光学器件各层材料的优化主要是针对透明导电层。选用吸收较小的透明导电层材料,可以从根本上减少液晶光学器件对入射激光的吸收。Gu等^[65]采用一种被称作Transcon™1低吸收导电层材料,制作了带有水冷散射系统的硅基板反射式液晶光学器件,它可在1.55 μm、400 W/cm²连续激光下辐照1 min而不出现损伤。

5 结束语

本文根据液晶光学器件的基本结构介绍了构成器件的透明导电膜、取向膜、液晶材料的近红外激光损伤研究进展,然后介绍了整体液晶器件在近红外高功率激光辐照下的性能退化及损伤现象。对于常用的ITO透明导电膜,载流子吸收导致的热熔融及气化等是ITO薄膜近红外纳秒脉冲、连续及准连续激光损伤的特点;在更短脉冲的近红外激光辐照下,ITO薄膜的损伤主要与热应力有关;在连续及准连续激光辐照下,ITO薄膜表现为纵向几十纳米到几微米的凸起。在近红外纳秒脉冲及准连续激光辐照下,光热效应是造成PI膜损伤的主要原因,在更短脉冲辐照下,PI膜的损伤主要是由光化学效应导致的。连续激光辐照会影响液晶光学器件的相位调制性能,随着辐照功率增大,液晶光学器件的相位调制深度会降低;在脉冲激光辐照下,典型的损伤特性表现为ITO薄膜因吸收激光能量而使其附近的液晶材料受热产生气泡甚至发生碳化。目前在液晶材料非线性效应方面的研究比较多,但是关于导致液晶材料发生非线性效应的液晶分子再取向、光致密度以及光热效应对液晶材料激光损伤的影响还不明确,可见,导致液晶材料性能退化甚至失效的机制还需要进一步的分析。此外,还未对液晶光学器件在高峰值功率激光(脉冲激光)和高平均功率(连续以及准连续)激光辐照下表现出的不同损伤特性的损伤机制进行详细对比,并且需要对激光辐照参数对液晶光学器件相位调控性能的退化和宏观损伤机制进行进一步研究,从而为液晶光学器件工艺优化提供进一步的指导方向。

参 考 文 献

- [1] Heebner J, Borden M, Miller P, et al. Programmable beam spatial shaping system for the national ignition facility [J]. Proceedings of SPIE, 2011, 7916: 79160H.
- [2] Huang D J, Fan W, Cheng H, et al. Wavefront control of laser beam using optically addressed liquid crystal modulator[J]. High Power Laser Science and Engineering, 2018, 6: e20.
- [3] Beeckman J, Neyts K, Vanbrabant P J M. Liquid-crystal photonic applications [J]. Optical Engineering, 2011, 50(8): 081202.
- [4] Jacobs S D, Cerqua K A, Marshall K L, et al. Liquid-crystal laser optics: design, fabrication, and performance[J]. Journal of the Optical Society of America B, 1988, 5(9): 1962-1979.
- [5] Chapin S C, Germain V, Dufresne E R. Automated trapping, assembly, and sorting with holographic optical tweezers[J]. Optics Express, 2006, 14(26): 13095-13100.
- [6] Sinclair G, Jordan P, Courtial J, et al. Assembly of 3-dimensional structures using programmable holographic optical tweezers [J]. Optics Express, 2004, 12(22): 5475-5480.
- [7] Mu Q Q, Cao Z L, Hu L F, et al. Open loop adaptive optics testbed on 2.16 meter telescope with liquid crystal corrector[J]. Optics Communications, 2012, 285(6): 896-899.
- [8] Ke X Z, Han K N. Wavefront simulation and wavefront correction of liquid crystal spatial light modulator [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(5): 051403.
柯熙政, 韩柯娜. 液晶空间光调制器的波前模拟及波前校正 [J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(5): 051403.
- [9] Resler D P, Hobbs D S, Sharp R C, et al. High-efficiency liquid-crystal optical phased-array beam steering[J]. Optics Letters, 1996, 21(9): 689-691.
- [10] Hu J, Du S P, Guo H Y. Research progress on beam scanning based on liquid crystal optical phased array [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(11): 110002.
胡婕, 杜升平, 郭弘扬. 基于液晶光学相控阵的光束扫描研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(11): 110002.
- [11] Wang X R, Zhou Z Q. Research progress of liquid crystal optical phased array in high power laser applications [J]. Infrared and Laser Engineering, 2018, 47(1): 0103006.
汪相如, 周庄奇. 液晶光学相控阵在高功率激光应用中的研究进展 [J]. 红外与激光工程, 2018, 47(1): 0103006.
- [12] Wu S T. Molecular design strategies for high birefringence liquid crystals [J]. MRS Proceedings, 2002, 709: 219-228.
- [13] Wu S T. Birefringence dispersions of liquid crystals [J]. Physical Review A, 1986, 33(2): 1270-1274.
- [14] Korenic E M, Jacobs S D, Houghton J K, et al. Nematic polymer liquid-crystal wave plate for high-power lasers at 1054 nm [J]. Applied Optics, 1994, 33(10): 1889-1899.
- [15] Kosc T Z, Owens A R, Rigatti A L, et al. Long-term performance of liquid crystal optics on large fusion lasers [C] // CLEO: 2013, June 9-14, 2013, San Jose, CA, USA. Washington, D. C.: OSA, 2013: CTu2D.3.
- [16] De Bougrenet De La Tochnaye J L. Engineering liquid crystals for optimal uses in optical communication systems [J]. Liquid Crystals, 2004, 31(2): 241-269.
- [17] Buck J, Serati S, Hosting L, et al. Polarization gratings for non-mechanical beam steering applications [J]. Proceedings of SPIE, 2012, 8395: 83950F.
- [18] Andrienko D, Kurioz Y, Nishikawa M, et al. Control of the anchoring energy of rubbed polyimide layers by irradiation with depolarized UV-light [J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2000, 39(3A): 1217-1220.
- [19] Xiao W B. Research on beam steering control based on liquid crystal optical phased array [D]. Chengdu: Institute of Optics and Electronics Chinese Academy Science, 2013: 11-12.
肖文奔. 基于液晶光学相控阵的光束偏转控制技术研究 [D]. 成都: 中国科学院光电技术研究所, 2013: 11-12.
- [20] Davis S R, Farca G, Rommel S D, et al. Analog, non-mechanical beam-steerer with 80 degree field of regard [J]. Proceedings of SPIE, 2008, 6971: 69710G.
- [21] Ma S J. Investigation of the modulation characteristics and applications of the liquid crystal spatial light modulator [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2014: 13.
马思津. 液晶空间光调制器相位调制特性测试及应用研究 [D]. 北京: 北京工业大学, 2014: 13.
- [22] Cai D M, Xue L X, Ling N, et al. Characteristics of phase only liquid crystal spatial light modulator [J]. Opto-Electronic Engineering, 2007, 34(11): 19-23.
蔡冬梅, 薛丽霞, 凌宁, 等. 液晶空间光调制器相位调制特性研究 [J]. 光电工程, 2007, 34(11): 19-23.
- [23] Lu Q, Sheng L, Zhang X, et al. Investigation on

- pure phase modulation characteristics of liquid crystal spatial light modulator at oblique incidence [J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(1): 0112001.
- 鲁强, 盛磊, 张鑫, 等. 斜入射下液晶空间光调制器纯相位调制特性研究[J]. 中国激光, 2016, 43(1): 0112001.
- [24] Shi Y B, Si L, Ma Y X. New progress of beam scanning technology [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(8): 080024.
- 师宇斌, 司磊, 马阎星. 光束扫描技术研究新进展[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(8): 080024.
- [25] Vladimirov F L, Pletneva N I, Morichev I E, et al. Liquid crystal modulators with improved laser damage resistance [J]. Proceedings of SPIE, 1998, 3682: 176-182.
- [26] Raszewski Z, Piecek W, Jaroszewicz L, et al. Laser damage resistant nematic liquid crystal cell [J]. Journal of Applied Physics, 2013, 114(5): 053104.
- [27] Marshall K L, Saulnier D, Xianyu H Q, et al. Liquid crystal near-IR laser beam shapers employing photoaddressable alignment layers for high-peak-power applications [J]. Proceedings of SPIE, 2013, 8828: 88280N.
- [28] Watson E A, Whitaker B, Harris S. Initial high-power-CW-laser testing of liquid-crystal optical phased arrays [R]. USA: Air Force Research Lab Sensors Directorate Wright-Patterson AFB Sensors Directorate, 2005.
- [29] Wang H F, Huang Z M, Zhang D Y, et al. Thickness effect on laser-induced-damage threshold of indium-tin oxide films at 1064 nm [J]. Journal of Applied Physics, 2011, 110(11): 113111.
- [30] Kim H, Horwitz J S, Kushto G, et al. Effect of film thickness on the properties of indium tin oxide thin films [J]. Journal of Applied Physics, 2000, 88(10): 6021-6025.
- [31] Tuna O, Selamat Y, Aygun G, et al. High quality ITO thin films grown by DC and RF sputtering without oxygen [J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2010, 43(5): 055402.
- [32] Yoo J H, Menor M G, Adams J J, et al. Laser damage mechanisms in conductive widegap semiconductor films [J]. Optics Express, 2016, 24(16): 17616-17634.
- [33] Yoo J H, Matthews M, Ramsey P, et al. Thermally ruggedized ITO transparent electrode films for high power optoelectronics [J]. Optics Express, 2017, 25(21): 25533-25545.
- [34] Elhadj S, Yoo J H, Negres R A, et al. Optical damage performance of conductive widegap semiconductors: spatial, temporal, and lifetime modeling [J]. Optical Materials Express, 2017, 7(1): 202-212.
- [35] Liu X F, Peng L P, Gao Y Q, et al. Laser damage characteristics of indium-tin-oxide film and polyimide film [J]. Infrared Physics & Technology, 2019, 99: 80-85.
- [36] Xiao S Z, Gurevich E L, Ostendorf A. Incubation effect and its influence on laser patterning of ITO thin film [J]. Applied Physics A, 2012, 107(2): 333-338.
- [37] Yoo J H, Lange A, Bude J, et al. Optical and electrical properties of indium tin oxide films near their laser damage threshold [J]. Optical Materials Express, 2017, 7(3): 817-826.
- [38] Peng L P, Zhao Y A, Liu X F, et al. Quasi-CW laser-induced damage of indium tin oxide films and polyimide films at 1064 nm wavelength [J]. Proceedings of SPIE, 2018, 10713: 10713M.
- [39] Li Y L. Laser damage on functional films of liquid crystal optical elements [D]. Mianyang: Institute of Fluid Physics China Academy of Engineering Physics, 2010: 18-19.
- 李阳龙. 液晶光学器件功能薄膜的激光损伤机理研究 [D]. 绵阳: 中国工程物理研究院流体物理研究所, 2010: 18-19.
- [40] Bai X. Effect of polyimide alignment film manufacturing conditions on the pretilt angle of liquid crystal [D]. Chengdu: Sichuan University, 2007: 12-13.
- 白星. 聚酰亚胺取向膜制备条件对液晶预倾角的影响 [D]. 成都: 四川大学, 2007: 12-13.
- [41] Haq B S, Khan H U, Alam K, et al. Femtosecond pulsed laser ablation of polyimide at oblique angles for medical applications [J]. Applied Optics, 2015, 54(24): 7413-7418.
- [42] Adhi K P, Owings R L, Railkar T A, et al. Chemical modifications in femtosecond ultraviolet (248 nm) excimer laser radiation-processed polyimide [J]. Applied Surface Science, 2004, 225: 324-331.
- [43] Lin C J, Hong G T, Pan R P. Alignment control of rubbed polyimide layers by UV-irradiation [J]. Molecular Crystals and Liquid Crystals, 2009, 512(1): 91-99.
- [44] Du Q F, Chen T, Liu J G, et al. Surface microstructure and chemistry of polyimide by single pulse ablation of picosecond laser [J]. Applied Surface Science, 2018, 434: 588-595.
- [45] Dyer P E, Pervolaraki M, Lippert T. Experimental studies and thermal modelling of 1064- and 532-nm Nd:YVO₄ micro-laser ablation of polyimide [J]. Applied Physics A, 2005, 80(3): 529-536.

- [46] Peng L P, Zhao Y A, Liu X F, et al. High-repetition-rate laser-induced damage of indium tin oxide films and polyimide films at a 1064 nm wavelength[J]. *Optical Materials Express*, 2019, 9(2): 911-922.
- [47] Marshall K L, Gan J, Mitchell G, et al. Laser-damage-resistant photoalignment layers for high-peak-power liquid crystal device applications [J]. *Proceedings of SPIE*, 2008, 7050: 70500L.
- [48] Marshall K L, Dorrer C, Vargas M, et al. Photo-aligned liquid crystal devices for high-peak-power laser applications[J]. *Proceedings of SPIE*, 2012, 8475: 84750U.
- [49] Dorrer C, Wei S K H, Leung P, et al. High-damage-threshold static laser beam shaping using optically patterned liquid-crystal devices [J]. *Optics Letters*, 2011, 36(20): 4035-4037.
- [50] Arakelyan S M, Lyakhov G A, Chilingaryan Y S. Nonlinear optics of liquid crystals[J]. *Soviet Physics Uspekhi*, 1980, 23(5): 245-268.
- [51] Khoo I C, Shen Y R. Liquid crystals: nonlinear optical properties and processes [J]. *Optical Engineering*, 1985, 24(4): 579-585.
- [52] Jánossy I, Kósa T. Influence of anthraquinone dyes on optical reorientation of nematic liquid crystals[J]. *Optics Letters*, 1992, 17(17): 1183-1185.
- [53] Lukishova S G. Nonlinear optical response of cyanobiphenyl liquid crystals to high-power, nanosecond laser radiation [J]. *Journal of Nonlinear Optical Physics & Materials*, 2000, 9(3): 365-411.
- [54] Soileau M J, van Stryland E W, Guha S, et al. Nonlinear optical properties of liquid crystals in the isotropic phase [J]. *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, 1987, 143(1): 139-143.
- [55] Zhao X J, Zhang D Y, Wang H F, et al. Research on high power laser induced diffraction ring in 5CB liquid crystal [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, 40(8): 1166-1171.
赵祥杰, 张大勇, 王海峰, 等. 强激光条件下 5CB 液晶中的激光诱导衍射环现象 [J]. *光子学报*, 2011, 40(8): 1166-1171.
- [56] Lukishova S G, Lebedev K S, Magulariya E A, et al. Reflective nonlinearity of nonabsorbing cholesteric liquid crystal mirrors driven by pulsed high-repetition-rate laser radiation[J]. *Proceedings of SPIE*, 1999, 3800: 164-172.
- [57] Kosc T Z, Marshall K L, Kozlov A A, et al. Damage testing of nematic liquid crystalline materials for femtosecond to nanosecond pulse lengths at 1053 nm[J]. *Proceedings of SPIE*, 2017, 10447: 104471G.
- [58] di Pietro V M, Jullien A, Bortolozzo U, et al. Thermally-induced nonlinear spatial shaping of infrared femtosecond pulses in nematic liquid crystals [J]. *Laser Physics Letters*, 2019, 16(1): 015301.
- [59] Kuzhelev A S, Dudelzak A E. Thermally induced holographic gratings in liquid crystals at telecommunications wavelengths [J]. *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, 2003, 5(3): L5-L8.
- [60] Cao Z L, Mu Q Q, Hu L F, et al. The durability of a liquid crystal modulator for use with a high power laser [J]. *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, 2007, 9(4): 427-430.
- [61] Zhu G, Whitehead D, Perrie W, et al. Investigation of the thermal and optical performance of a spatial light modulator with high average power picosecond laser exposure for materials processing applications [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2018, 51(9): 095603.
- [62] He X X, Wang X R, Wu L, et al. Theoretical modeling on the laser induced effect of liquid crystal optical phased beam steering [J]. *Optics Communications*, 2017, 382: 437-443.
- [63] Zhou Z Q, Wang X R, Zhuo R S, et al. Theoretical modeling on the laser-induced phase deformation of liquid crystal optical phased shifter [J]. *Applied Physics B*, 2018, 124(3): 35.
- [64] Zhou Z Q. Research on tolerance high laser power of liquid crystal optical phased array devices [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2015: 61-63.
周庄奇. 高耐受功率液晶光学相控阵器件研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2015: 61-63.
- [65] Gu D, Wen B, Mahajan M, et al. High power liquid crystal spatial light modulators [J]. *Proceedings of SPIE*, 2006, 6306: 630602.