

液晶相位调控器件的高功率激光应用相关问题*

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

(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. 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; 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. 华中科技大学 光学与电子信息学院, 武汉 430070)

摘 要: 液晶相位调控器件在聚变点火、激光加工、光电对抗、激光雷达、激光通讯、激光防护等高功率激光领域有着非常广泛的应用及应用前景。但受限于构成器件材料自身抗激光损伤能力的限制以及缺乏对高功率激光辐照下液晶相位调控器件相位调控性能退化及损伤特性的系统研究, 目前液晶相位调控器件的激光耐受力还难以满足高功率激光系统的应用和发展需求。为指导高激光耐受力液晶相位调控器件的制备工艺优化, 对液晶相位调控器件在高峰值和高平均功率激光应用下出现的损伤现象以及性能退化进行了综述, 最后对液晶相位调控器件激光耐受力提升方法做了总结和归纳。

关键词: 液晶; 高功率激光; 相位调控; 激光损伤; 工艺优化

中图分类号: O436

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202032.190426

Application problems of liquid crystal phase modulators to high power lasers

Liu Xiaofeng^{1,2,3}, Zhao Yuan'an^{1,3}, Peng Liping^{1,3,4}, Wang Xiaoshuang⁵, Li Dawei^{1,3}, Shao Jianda^{1,3}

(1. Laboratory of Thin Film Optics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Shanghai 201800, China;

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

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

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

5. School of Optical and Electronic Information, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract: The liquid crystal phase modulators (LCPMs) have applications and prospects in fusion ignition, laser processing, optoelectronic countermeasure, laser radar, laser communication, laser protection and so on. However, owing to the limited laser damage resistance of the materials constituting the LCPMs as well as insufficient system research on the laser damage and the phase modulation performance degradation of LCPMs induced by high power lasers, the laser handling power of LCPMs cannot satisfy the requirements of high power laser developments. To provide guidance for optimizing the fabrication process of LCPMs with high laser handling power, we reviewed the laser damage and the phase modulation performance degradation characteristics of LCPMs irradiated by high-peak-power lasers and high-average-power-lasers and then summarized the methods to improve the laser handling power of LCPMs.

Key words: liquid crystal; high power lasers; phase modulation; laser damage; optimization of the fabrication process

液晶材料具有流动性、各向异性以及分子取向可电控等特点, 可以根据应用需求与透明导电膜和取向膜等组合制备成各类液晶相位调控器件。液晶相位调控器件通过改变入射光束非寻常光的相位, 可以实现对光束振幅、波前、偏振和指向等参数的精密调节, 加之具有分辨率高、动态非机械调节、结构紧凑、质量轻、功耗低、成本低等优点, 除了被广泛应用于液晶显示^[1]、全息成像^[2]、高光谱成像^[3]、自适应光学^[4-5]等显示成像及天文领域, 在高功率激光领域也得到了非常广泛的研究及应用。

液晶相位调控器件在高功率激光系统的应用始于 1979 年, 当时天然双折射晶体难以满足高功率激光系统对

* 收稿日期: 2019-11-13; 修订日期: 2020-01-06

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

作者简介: 刘晓凤(1982—), 女, 博士, 副研究员, 从事激光辐照效应与机理研究; liuxiaofeng@siom.ac.cn。

元件大尺寸的要求,迫使科研工作者不得不去寻找合成材料来替代传统的天然晶体,各项异性液晶材料的灵活性使其成为解决这个问题的理想途径。美国罗切斯特大学在20世纪80年代对液晶器件的设计、制备及性能进行了大量的研究,成功地研制了适用于高峰值功率激光系统的液晶波片、液晶偏振片/隔离器、液晶光阑等^[6],并随后在60路OMEGA高峰值功率激光装置中安装使用了超过300个大口径液晶器件,据报道部分液晶器件工作了15年甚至更长时间,其性能都没有出现明显退化^[7]。液晶相位调控器件在美国国家激光聚变点火装置(NIF)、中国神光系列高功率激光系统上也得到了成功应用,被用于光束强度空间分布的主动调制,以实现光束整形、损伤点“预屏蔽”等目的^[8-9]。

除了上述在高峰值功率激光系统的应用,液晶相位调控器件在高平均功率激光系统中也有着广泛的应用及应用潜力。例如在飞秒激光加工领域,常利用液晶相位调控器件将扩束准直后的飞秒激光空间光场精确地调制成预设的图案阵列,达到高效并行加工的目的^[10-11]。在光电对抗、激光通讯、激光雷达等领域,基于液晶相位调控器件的光束偏转技术一直是国内外研究的热点^[12-15]。传统的光束偏转系统依靠万向节机械结构调节反射镜实现光束偏转,结构复杂、精度低、重量大、能耗高,在运动过程中还需要克服惯性的影响,非常不利于微型化,液晶相位调控器件有望成为替代传统基于万向节机械结构调节实现光束转向的颠覆性技术。美国在基于液晶相位调控器件的光束偏转技术研究方面目前处于绝对领先的地位,突破了对光束大角度、快速转向的系列关键技术问题。20世纪90年代,美国Raytheon公司已经研制了多款不同口径和独立寻址数的液晶光学相位调控器件^[16-17]。随后2007年,美国Raytheon公司利用基于液晶相位调控器件的7个子口径阵列式原型样机,实现了大口径光束偏转^[18]。2008年,美国Vescent Photonics公司研制的基于液晶的一维光束偏转器件,其最大偏转角度可以达到 $\pm 40^\circ$ ^[19]。2012年,美国BNS公司成功研制了基于液晶材料的商业化小口径(通光口径 ~ 5 cm)光束偏转产品,实现了 $112^\circ \times 112^\circ$ 的偏转视场,光束偏转误差可控制在mrad量级^[20]。2017年,BNS公司又成功研制了大口径宽角度液晶偏转器件,器件通光口径达到10 cm,偏转视场可达 $64^\circ \times 64^\circ$ ^[21]。此外,液晶相位调控器件用于全光开关在自激活激光防护方面也有着诱人的吸引力^[22]。

可见,随着高功率激光技术的发展,液晶光学相位调制器在各类高功率激光装置中具有明确的应用需求。液晶相位调控器件的激光耐受能力是其在高功率激光装置中应用必须要考虑的问题。液晶相位调控器件由多层材料构成,除了受限于液晶相位调控器件组成材料自身抗激光损伤能力的限制,液晶相位调控器件在激光辐照下性能演化失效的机理问题也还缺乏系统性研究,这造成目前液晶相位调控器件的激光耐受力还难以满足高功率激光系统的发展需求和实际应用。本文结合液晶相位调控器件在高功率激光系统中的实际应用,归纳总结了液晶相位调控器件在高峰值功率以及高平均功率激光应用下的激光损伤问题及其抗激光损伤能力的途径。

1 液晶相位调控器件在高峰值功率激光应用下的损伤问题

实际应用于高峰值功率激光系统的液晶相位调控器件,可以根据器件能否对光束参数进行动态实时调节分为主动型和被动型液晶相位调控器件两类^[6,23]。

1.1 主动型液晶相位调控器件的高峰值功率激光损伤

主动型液晶相位调控器件通常主要由透明导电层、取向层、液晶材料和玻璃基底构成,构成上述器件的单一材料的抗激光损伤能力为:透明导电层 $<$ 取向层 $<$ 液晶材料 $<$ 玻璃基底^[24]。实验表明主动型液晶相位调控器件在1 064 nm波段高峰值功率纳秒脉冲激光辐照下的抗激光损伤能力与透明导电层的抗激光损伤能力相当,仅在 $2\sim 3$ J/cm²(15 ns)^[24],甚至数百mJ/cm²(10 ns)^[25-26]。高峰值功率激光辐照下,透明导电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,而随着辐照能量的升高,不可恢复的永久性气泡产生,最终造成液晶光学器件出现固定的可见损伤,形成残碳^[24]。可见,主动型液晶相位调控器件在高峰值功率激光下的抗激光损伤能力主要受限于透明导电材料。对于常见的ITO(氧化铟锡)薄膜,降低膜层沉积温度、减少镀制厚度、选择高热扩散系数的基底、在表面沉积热扩散系数比较大的保护层等均可以进一步提升ITO薄膜的激光损伤阈值^[27-29]。但目前主动型液晶相位调控器件在高峰值功率激光辐照下的损伤研究仍局限在表象和基本物理过程的规律性描述,或是单一材料抗激光损伤能力的研究,整体器件制备工艺优化的方向还不明确。加上液晶器件的制备工艺还主要是针对器件的光学性能,器件抗激光损伤能力的提升还需要在原有制备工艺基础进行大量的优化。有报道在传统的扭曲相列液晶中混合极性液晶,可以将主动型液晶相位调控器件的抗激光损伤能力从0.2 J/cm²提升到0.4 J/cm²(1 064 nm, 10 ns),在此基础上通过增加透明导电层的方块电阻、利用高损伤阈值尼龙取向材料取

代低损伤阈值聚酰亚胺 (PI) 取向材料、使用新的天鹅绒滚轮摩擦、提高液晶材料的纯度、控制液晶分子在 $0.22 \mu\text{m}$ 、增加环境的洁净度等, 主动型液晶相位调控器件的抗激光损伤能力可进一步提高到 0.6 J/cm^2 ^[30]。需要指出的是, 目前单一参数以及全参数优化对器件抗激光损伤能力的影响还未见深入系统的研究, 尤其是关于单一改善透明导电材料对主动型液晶器件在峰值功率激光下抗激光损伤能力的提升程度还未见相关实验报道。所以目前关于主动型液晶相位调控器件在峰值功率激光辐照下的抗激光损伤潜力还不清楚。

为了层析器件整体抗激光损伤能力与构成材料之间的物理关联, 明确高激光耐受能力主动型液晶器件制备工艺的优化方向, 课题组对比分析了透明导电层和取向层的高峰值功率激光 (1064 nm , 10 ns) 损伤特性^[31]。参考主动型液晶相位调控器件的结构, 实验中将制备液晶相位调控器件最常用的 ITO 透明导电材料镀制玻璃基底, 再将常用的聚酰亚胺 (PI) 取向材料旋涂于 ITO 薄膜上。

研究发现 ITO 薄膜的典型损伤形貌如图 1 和图 2 所示。在近阈值能流辐照下, 损伤表现为熔融、蒸发, 损伤中心 ITO 材料完全蒸发, 玻璃基底裸露出来, 基底没有破坏。在损伤的外围可以看到熔融的凸起 (图 1(b)), 凸起周围出现了裂纹 (图 1(c)), 未损伤区的 ITO 薄膜不存在裂纹 (图 1(d))。辐照能流略高, 仅是 ITO 薄膜被大片蒸发, 基底未出现破坏, 如图 2(a) 所示。图 2(b) 的深度测试结果表明破坏深度在 25 nm 左右, 与 ITO 薄膜的厚度相同, ITO 薄膜已经被完全移除。

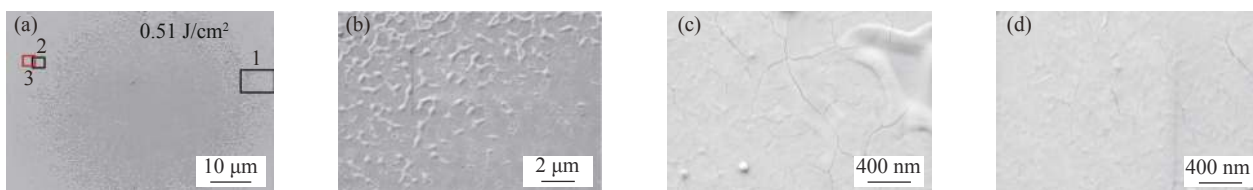


Fig. 1 Typical damage morphology of ITO/glass at a lower fluence (near the LIDT). (b), (c), and (d) show local magnified views of micro-areas outlined by the rectangles 1, 2, and 3 in (a), respectively

图 1 阈值附近 ITO 的典型损伤形貌, 其中 (b), (c) (d) 分别对应 (a) 中 1, 2, 3 所示的方框位置

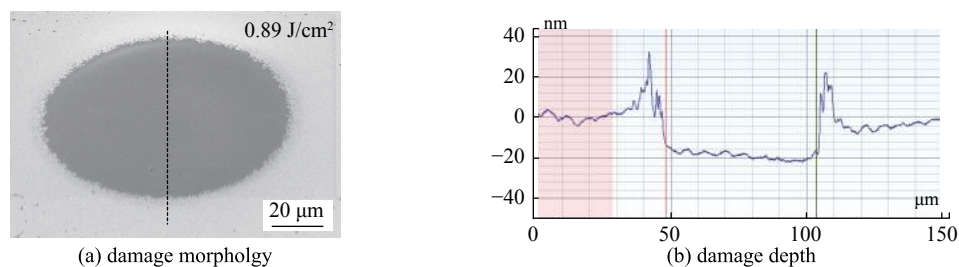


Fig. 2 Typical damage morphology and depth profile of the ITO/glass sample at a higher fluence (near 100% damage probability)

图 2 ITO 薄膜在 100% 损伤几率能流下的典型损伤形貌及损伤深度

高功率激光辐照下, PI/ITO 薄膜的典型损伤形貌如图 3 所示, 激光辐照过程中损伤表现内部熔融凸起, 辐照后凸起冷却, 能量的进一步升高导致内部熔融突破表面的束缚, 凸起破裂。



Fig. 3 Typical damage morphologies of the PI/ITO/glass sample

图 3 PI/ITO 薄膜的典型损伤形貌

ITO 和 PI 薄膜的损伤主要归因于 ITO 薄膜的强吸收。基于热传导的温度场模拟结果表明近阈值附近, ITO 薄膜的温度在瞬时上升到上千度如图 4(a), 达到 ITO 薄膜的融化温度, 甚至汽化温度, 这与 ITO 薄膜的融化、蒸发现象相吻合。底层 ITO 的温度高于表层 PI 的温度如图 4(b) 所示, 所以底层的 ITO 薄膜首先受热融化、蒸发, 表层的

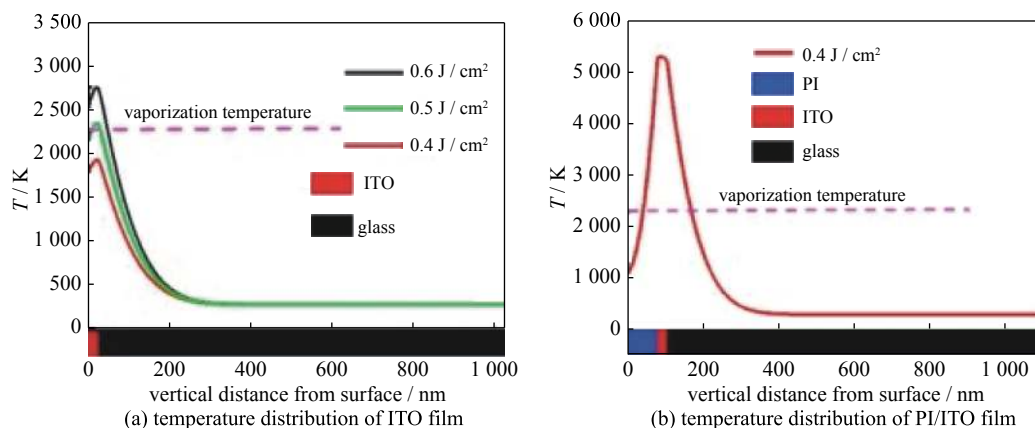


Fig. 4 Temperature distribution of the irradiated center in the samples. The dashed lines represent the vaporization temperature of the ITO film

图4 高功率激光辐照下, ITO 和 PI 薄膜的温度场分布

PI 随着底层 ITO 体积的膨胀而发生塑性形变, 出现如图 3 所示的损伤。同一激光能流辐照下, PI/ITO 薄膜的温升较 ITO 薄膜温升高, 这主要是与 PI 的热导率比较低、ITO 薄膜产生的热扩散不出去有关。

ITO 薄膜和 PI 薄膜的损伤特性及温度场分析结果意味着液晶相位调控器件在高峰值功率激光作用下, ITO 层吸收的热来不及扩散, ITO 层会瞬时吸收产生上千度的温升并汽化, 首先破坏。所以, 优化透明导电膜材料是制备高峰值功率激光用的主动型液晶相位调控器件首先需要考虑的关键因素。

1.2 被动型液晶相位调控器件的高峰值功率激光损伤研究

被动型液晶器件主要包括取向层、液晶层及玻璃基板, 研究表明其抗激光损伤能力主要受限于取向层^[32]。应用于美国 OMEGA 高峰值功率激光装置中的基于尼龙 6/6 材料取向层的 100 mm 口径液晶偏振片长期安全工作在 $3\sim 5\text{ J/cm}^2$ (1 053 nm, 1 ns) 能流密度辐照下^[6]。国内上海光学精密机械研究所基于偶氮苯 (azobenzene) 光控取向材料研制的二元液晶面板的损伤阈值达 15 J/cm^2 (1 064 nm, 10 ns)^[33]。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长时间安全应用的问题。通过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/cm^2 (1 053 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 30 J/cm^2 (1 053 nm, 1 ns)^[34]。

2 液晶相位调控器件在高平均功率激光应用下的性能退化及退化机理

应用于高平均功率激光的液晶相位调控器件通常是带有导电层的主动型液晶器件。由于高峰值功率激光作用时间非常短, 所以高峰值功率激光作用下液晶相位调控器件的激光耐受力研究主要是关于高峰值激光辐照过后在线 CCD 下可以观测的宏观损伤, 还未见高峰值功率激光辐照过程中对器件瞬时相位调控性能的影响报道。而高平均功率激光作用是一个长时间缓慢的升温过程, 激光辐照对器件相位性能的影响比较容易探测, 所以大部分是关于液晶相位调控器件在高平均功率激光辐照下相位调制性能退化的研究。

2.1 液晶相位调控器件在高平均功率激光辐照下的性能退化现象

当入射光偏振方向介于液晶分子的长轴和短轴之间, 如果液晶相位调控器件的相位调制特性发生变化, 经过器件的出射光偏振态会发生改变, 所以液晶相位调控器件在高平均功率激光加载条件下的相位调制特性变化常用起偏检偏的方法进行测量, 基本工作原理如图 5 所示。通常氦氖 (He-Ne) 探测光经过起偏器产生偏振方向相对于液晶分子光轴 45° 的偏振光, 偏振光入射到液晶相位调控器件上高平均功率激光辐照的位置, 出射后的 He-Ne 探测光再通过检偏器检偏, 最后通过透射光的强度来反演激光加载条件液晶相位调控器件相位调制特性的变化。

中国科学院长春光学精密机械与物理研究所报道了未加电状态下的液晶相位调控器件在 808 nm 高平均连续激光辐照下的性能退化研究^[35]。当辐照激光平均功率密度低于 133 W/cm^2 时, 通过检偏器后的出射光强度没有变化, 显微镜下液晶材料表现为均匀的明亮状态; 当辐照激光平均功率密

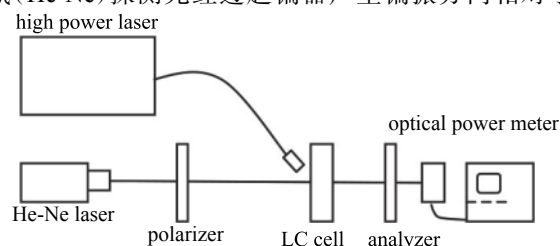


Fig. 5 Schematic diagram of measuring phase modulation of the liquid crystal device induced by the high-average-power laser^[35]

图5 高平均功率激光辐照下, 液晶光学器件相位特性变化的检测原理图^[35]

度大于 133 W/cm^2 ，检偏器后的出射光强度开始发生变化，辐照区域出现明显的亮暗交替区域；当辐照激光平均功率密度从 325 W/cm^2 下降到 133 W/cm^2 以下时，材料又恢复为均匀的明亮状态，如图 6 所示。

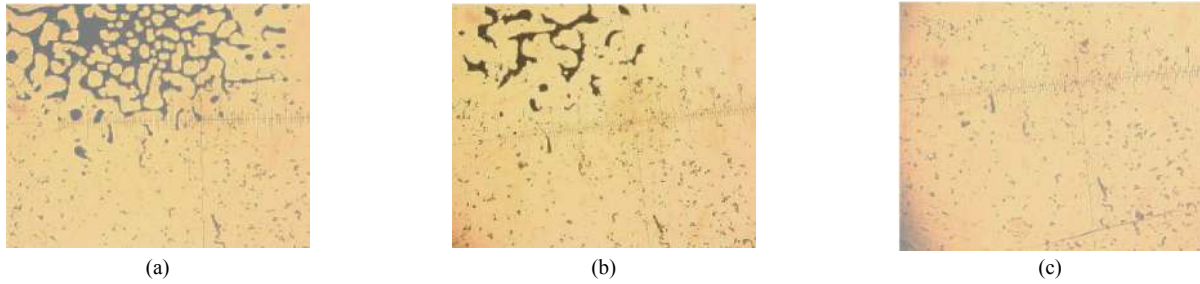


Fig. 6 Morphologies observed by the polarized light microscope for decrease in the laser power density from 141 W/cm^2 to 133 W/cm^2

图 6 连续激光辐照功率 141 W/cm^2 下降到 133 W/cm^2 的过程中，偏光显微镜下观察到器件内部液晶材状态的变化^[35]

美国空军实验室研究了实际加电工作状态下的液晶相位调控器件在 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^[36]。实验表明当辐照激光功率密度低于 102 W/cm^2 时（其中入射光斑高斯直径为 5 mm ， 10 W 的入射功率对应 102 W/cm^2 的辐照功率密度），通过检偏器的透射光的强度随输入电压（像素）的变化与未辐照时基本一致，液晶器件的相位调控能力器件基本不受影响；在辐照激光功率逐渐升高至 $\sim 1000 \text{ W/cm}^2$ 的过程中，相同电压加载情况下通过检偏的透射光强度发生变化，液晶器件的相位调控深度随辐照激光功率密度升高而降低，如图 7 所示。当激光关闭或者降低辐照激光功率到 102 W/cm^2 以下时，液晶器件的相位调制特性又可逐渐恢复。

英国利物浦大学报道了 1064 nm ， 10 ps 皮秒准连续激光 ($10 \text{ kHz} \sim 2 \text{ MHz}$) 辐照下，液晶器件在实际加电状态的相位调制特性变化^[37]。研究表明液晶相位调控器件的温度随着辐照激光功率的增加而上升，尽管当入射激光功率为 220 W 时，红外热像仪测量的器件温度上升仅为 $5 \text{ }^\circ\text{C}$ ，但实际测量发现超过 130 W 激光辐照时，经过检偏器后的出射激光强度已经开始发生变化，器件的相位调制深度开始小于 2π 。

由上可见，高平均功率激光加载下液晶相位调控器件相位调控特性的变化规律基本不随辐照激光波长、脉宽、重复频率变化，表现为相位调制深度的降低，在一定范围高平均功率激光辐照下，相位调制特性可以恢复。

2.2 液晶相位调控器件在高平均功率激光应用下的性能退化机理研究

为了明确液晶相位调控器件在高平均功率激光辐照下的性能退化机理与构成材料之间的关联，课题组对 ITO 和 PI 薄膜在高平均功率下的激光损伤特性进行了分析^[38-39]。不同功率密度激光辐照下的损伤形貌如图 8 所示。实际研究中发现 2.1 节报道的导致液晶器件性能退化的激光功率密度远未达到 ITO 和 PI 薄膜的激光损伤阈值。对于 PI/ITO 薄膜来说，初始损伤均表现为鼓包；随着辐照功率的增加，鼓包高度增加；损伤的横向直径远大于纵向高度；近阈值附近的损伤高度在 $\sim 25 \text{ nm}$ ，最大损伤高度在 $\sim 200 \text{ nm}$ ；近阈值附近的损伤直径在 $\sim 200 \text{ }\mu\text{m}$ ，最大损伤直径在 $\sim 1 \text{ mm}$ 。SEM 下无法识别样品表面的鼓包，这意味着膜层没有出现熔融蒸发等现象，膜层表面也没有出现破裂等突变性结构。通过去除表面膜层，对比相应区域的基底损伤，发现相应区域的基底并未出现损伤，这说明明凸起是在膜层内，损伤仅与膜层有关。

高平均功率激光辐照下 PI/ITO 薄膜表面的凸起与 PI/ITO 薄膜的低温升有关。PI/ITO 薄膜的温度场模拟结果表明辐照中心的最高温度仅在百 K 量级，这会诱导一定程度的热应力，从而造成 PI/ITO 薄膜表面的几十 nm 的凸起。从图 9 所示近阈值功率辐照下，PI/ITO 薄膜纵向温度随时间变化的模拟结果可以看出高平均功率激光辐照下，PI/ITO 薄膜在 30 s 内辐照温升达到稳定，整个膜层是主要吸收热源，基底是主要热传导源。这与表面凸起主要局限在膜层内，不涉及基底的实验现象相吻合。这同时也意味着不同于高峰值功率激光条件下，液晶器件在高平

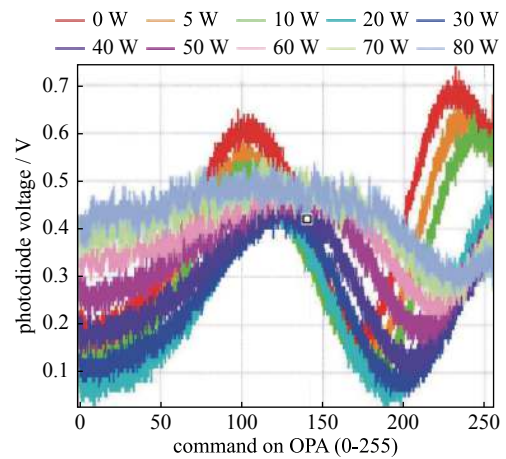


Fig. 7 Transmitted He-Ne light intensity after the analyzer varies with voltage applied on the liquid crystal device when the liquid crystal device is irradiated by different laser power densities^[36]

图 7 不同功率密度激光辐照液晶器件的过程中，通过检偏器的 He-Ne 透射光强度随液晶器件加载电压的变化^[36]

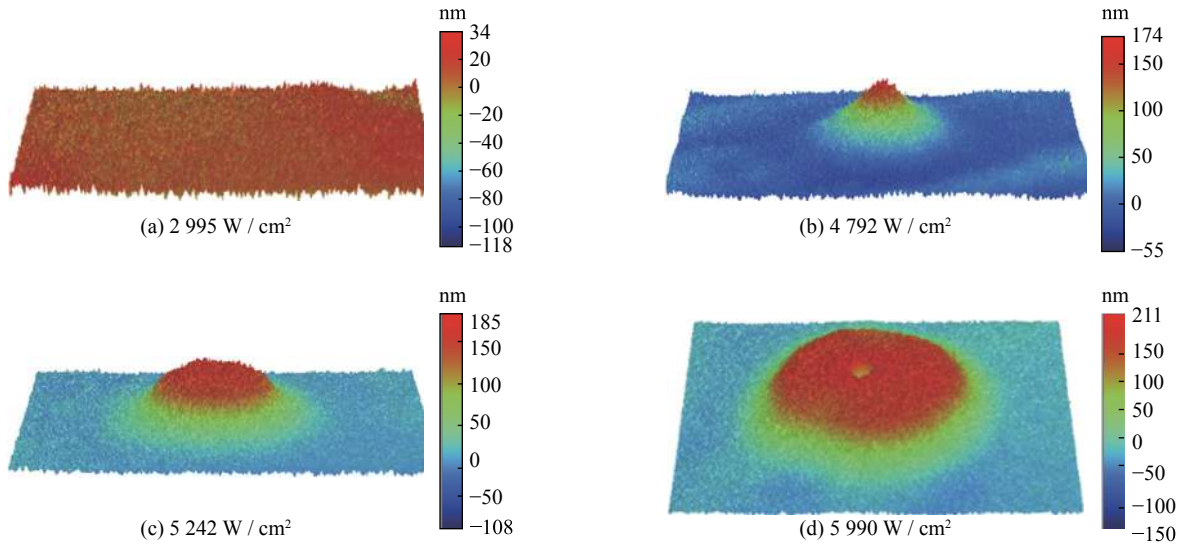


Fig. 8 Damage morphologies induced by different power densities
图 8 不同功率密度激光辐照下的损伤形貌

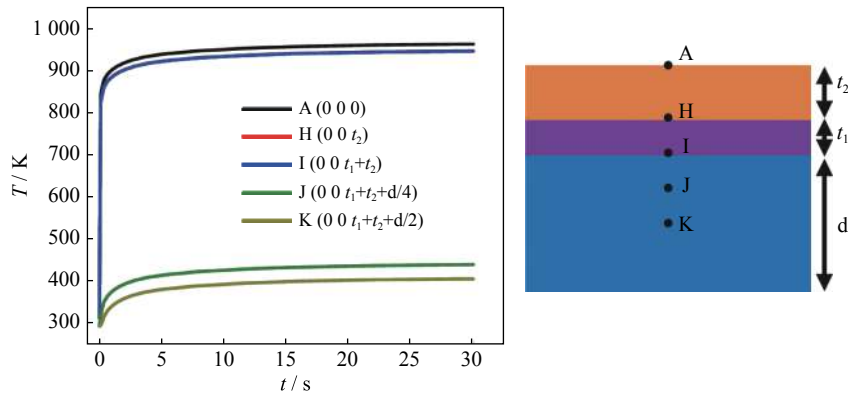


Fig. 9 Vertical temperature distribution in first 30 s under 3 000 W/cm² laser irradiation
图 9 3 000 W/cm² 激光辐照下, 30 s 内 ITO/PI 样品的纵向温度变化

均功率激光作用下, ITO 层吸热升温缓慢, 热量传导后器件内温度梯度小, 由于常用液晶材料的清亮点温度通常比较低 ($\sim 100\text{ }^\circ\text{C}$)^[35,40], 所以液晶分子会首先失效。

高平均功率激光辐照下, 液晶相位调控器件的整体温升较低, 但是关于这个低温升对器件相位调控性能的具体影响机制大家认识还不统一。线偏振光经过反射型液晶纯相位调控器件的相位变化可以表示为^[37,41]

$$\phi = (4\pi/\lambda)\Delta nL = (4\pi/\lambda)(n_e(\theta) - n_o) = (4\pi/\lambda)\left(\frac{n_o n_e}{\sqrt{n_o^2 \cos^2 \theta + n_e^2 \sin^2 \theta}} - n_o\right) \quad (1)$$

式中: λ 是入射激光波长; L 是液晶材料的厚度; Δn 是液晶分子的双折射率, 与液晶分子长轴折射率 n_e 、短轴折射率 n_o 以及液晶分子转动角度 θ 有关。可以看出, 液晶器件的相位调制特性主要与液晶材料的折射率、转动角度、液晶盒厚度这三个因素影响。

电子科技大学建立了连续激光辐照下液晶器件的相位调制模型^[40,42], 认为温度影响了液晶分子的折射率以及转动角度。该课题组首先利用有限元建模分析激光辐照下器件的温度场分布, 然后结合液晶分子折射率、倾斜角度与温度的关系, 获得不同温度下液晶分子的折射率、倾斜角。其中, 液晶分子长轴和短轴方向的折射率与温度的关系可以通过 vuks 理论获得

$$n_o(T) = A - BT + \frac{(\Delta n)_o}{3} \left(1 - \frac{T}{T_c}\right)^\beta \quad (2)$$

$$n_e(T) = A - BT + \frac{2(\Delta n)_o}{3} \left(1 - \frac{T}{T_c}\right)^\beta \quad (3)$$

式中： $(\Delta n)_0$ 是温度为 0 K 时液晶分子对应的双折射率； T_c 是液晶分子清亮点的温度； A, B, β 是与液晶材料有关的常量，可以通过拟合液晶双折射率与温度的依赖关系获得^[43]。

液晶分子倾斜角与温度之间的依赖公式如下

$$-\varepsilon_0 \Delta \varepsilon(T) E \sin \theta \cos \theta - \{K_{33}(T) - K_{11}(T)\} \sin \theta \cos \theta \left(\frac{\partial \theta}{\partial z} \right) - \{K_{11}(T) \cos^2 \theta + K_{33}(T) \sin^2 \theta\} \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} \right) = 0 \quad (4)$$

式中： ε_0 是真空介电常量；液晶材料的介电各项异性 $\Delta \varepsilon(T)$ ；弹性系数 $K_{ii}(T)$ 均受温度影响，影响关系如下

$$\Delta \varepsilon(T) = (\Delta \varepsilon)_0 \left(1 - \frac{T}{T_c} \right)^\beta \quad (5)$$

$$K_{ii}(T) = (K_{ii})_0 \left(1 - \frac{T}{T_c} \right)^{2\beta} \quad (6)$$

模拟表明对于整体吸收率为 5%，带有冷却流速为 0.01 m/s 高效散射系统的硅基板反射式液晶光学器件，在 140 W/cm² 激光功率入射下，激光诱导的相位畸变不到 0.06，中心的最大温升不超过 1 K^[40]。

英国利物浦大学通过对比分析对高平均功率激光辐照下液晶相位调控器件的温度测试以及相位调制特性的测试结果和模拟结果，研究了液晶分子折射率和液晶盒厚度变化对液晶相位调制特性的影响，认为高平均功率激光辐照下液晶器件相位调制的变化主要是由于器件受热厚度发生了变化^[42]。液晶双折射率随温度的变化可以由下面的经验公式获得^[44]

$$\Delta n = \Delta n_0 (1 - T/T_c)^\beta \quad (7)$$

在 $T = 293 \text{ K}$ (20 °C)， $T_c = 333 \text{ K}$ (60 °C)， $\Delta n = 0.30$ ， $\beta = 0.19$ 的条件下，可以计算 $\Delta n_0 = 0.45$ ，所以当升温 5 °C 时，根据公式(1)计算的相位变化仅为 -0.06π 。液晶双折射率随温度的变化引起的光束相位变化非常小，因此作者指出导致液晶器件相位调制性能变化的主要因素不是液晶折射率随温度的变化，而是液晶器件受热后的厚度变化。考虑激光辐照在器件表面温度分布，作者将高平均功率激光辐照引起液晶相位调控器件厚度的变化假设为三个同心圆。依据上述厚度模型模拟的通过检偏后的探测光归一化透过率与实际测量结果具有比较好的一致性，如图 10 所示。

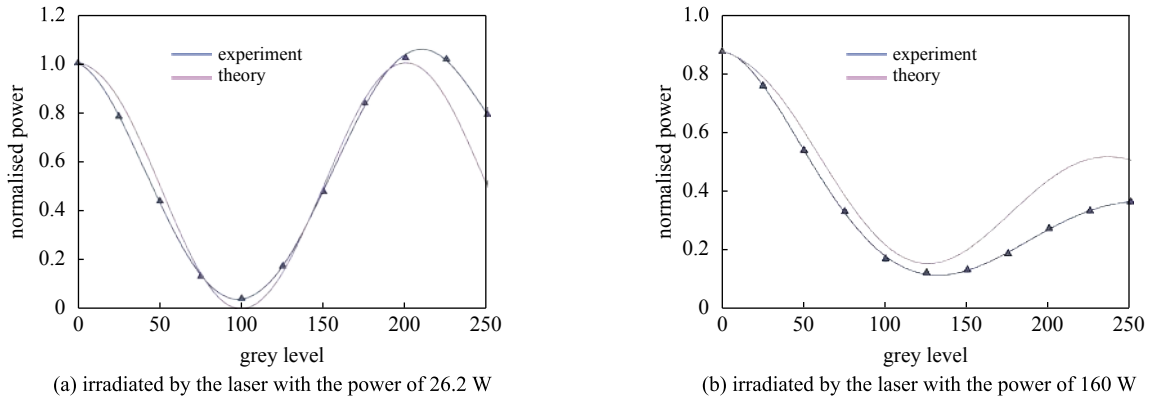


Fig. 10 Simulation and measurement results of the normalized transmitted power of the probe laser after the analyzer^[37]

图 10 通过检偏后的探测光归一化透过率模拟结果和实测结果^[37]

美国空军实验室认为高平均功率激光辐照下，液晶相位调控器件相位调控性能的变化是由于器件边缘隔离垫和密封胶的热胀冷缩造成的^[36]。当温度升高时，液晶不如隔离垫和密封胶膨胀的多。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和玻璃基板之间的体积，空气从密封胶线上任何未密封的空隙进入填充剩下的体积。随后，冷却使隔离垫和密封胶收缩，使得玻璃基板更靠近背板，这个过程挤出一些空气，同时也会将空气前面的液晶材料排出。

尽管目前对高平均功率激光辐照导致的温度对液晶器件相位调控性能的具体影响机制还不明确，但是要提高高平均功率激光用液晶器件的激光耐受力必须降低器件的温升，主要可以从减少激光能量吸收、增加辅助散热、提高器件的热扩散等方面去考虑^[11, 45-46]。电子科技大学从器件整体吸收率、热沉积结构、冷却流速、基底材料四个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，认为冷却流速和热沉积结构是降低器件温升，提升入

射激光功率的两个最重要的因素,并建议采用热传导系数较高的硅基板取代背板玻璃。该课题组研制的以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,此时液晶层温度仅仅上升10℃左右^[45]。有报道采用低吸收导电层材料,带有水冷散射系统的硅基板反射式液晶光学器件在1.55 μm,400 W/cm²连续激光辐照1 min没有出现损伤^[46]。

3 结 论

液晶相位调控器件在高峰值功率激光应用下,ITO层会瞬时吸收激光能量产生上千度的温升并汽化,冲破PI层的束缚,形成器质性损伤;液晶相位调控器件在高平均功率激光应用下,ITO层吸热温升缓慢,热量传导后器件内温度梯度较小,但由于液晶材料的清亮点比较低,液晶分子会首先失效。高峰值功率激光用液晶相位调控器件制备工艺的优化应首先考虑降低透明导电层的吸收;高平均功率激光用液晶相位调控器件制备工艺的优化除了需要降低透明导电层的吸收外,增加辅助散射以及采用热扩散率较大的基底也是非常有效的优化手段。上述分析总结对应用于高功率激光系统中液晶相位调控器件的设计、制备以及实际应用提供了重要的指导。

致 谢 感谢中国科学院上海光学精密机械研究所黄大杰高级工程师和中国工程物理研究院上海激光等离子体研究所高妍琦研究员给予的指导和帮助。

参 考 文 献:

- [1] 李维謨,郭强.液晶显示应用技术[M].北京:电子工业出版社,2005.(Li Weishi, Guo Qiang. Application technology of liquid crystal display[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2005)
- [2] 叶必卿.液晶空间光调制器特性研究及在全息测量中的应用[D].杭州:浙江大学,2006.(Ye Biqing. The Characteristics of liquid-crystal spatial light modulator and its application[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2006)
- [3] Beekman J, Neyts K, Vanbrabant P J M. Liquid-crystal photonic applications[J]. *Optical Engineering*, 2011, 50: 081202.
- [4] Cao Z, Mu Q, Hu L, et al. Preliminary use of nematic liquid crystal adaptive optics with a 2.16-meter reflecting telescope[J]. *Optics Express*, 2009, 17(4): 2530-2537.
- [5] Dayton D, Gonglewski J, Restaino S, et al. Demonstration of new technology MEMS and liquid crystal adaptive optics on bright astronomical objects and satellites[J]. *Optics Express*, 2002, 10(25): 1508-1519.
- [6] 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: Optical Physics*, 1988, 5(9): 1962-1979.
- [7] Marshall K L, Wei S K H, Vargas M, et al. Liquid crystal beam-shaping devices employing patterned photoalignment layers for high-peak-power laser applications[C]//Proc of SPIE. 2011: 81140P.
- [8] Heebner J, Borden M, Miller P, et al. Programmable beam spatial shaping system for the National Ignition Facility[C]//Proc of SPIE. 2011: 79160H.
- [9] 郑万国,李平,张锐,等.高功率激光装置光束精密调控性能研究进展[J].*强激光与粒子束*, 2020, 32: 011003.(Zheng Wanguo, Li Ping, Zhang Rui, et al. Progress on laser precise control for high power laser facility[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2020, 32: 011003)
- [10] Hayasaki Y, Sugimoto T, Takita A, et al. Variable holographic femtosecond laser processing by use of a spatial light modulator[J]. *Applied Physics Letters*, 2005, 87: 031103.
- [11] Beck R J, Parry J P, MacPherson W N, et al. Application of cooled spatial light modulator for high power nanosecond laser micromachining[J]. *Optics Express*, 2010, 18(16): 17059-17065.
- [12] 赵祥杰,张大勇,骆永全.反射式液晶空间光调制器电控光束偏转[J].*强激光与粒子束*, 2012, 24(6): 1324-1328.(Zhao Xiangjie, Zhang Dayong, Luo Yongquan. Electro-controllable optical beam deflection employing reflective liquid crystal spatial light modulator[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2012, 24(6): 1324-1328)
- [13] He Xiaoxian, Wang Xiangru, Wu Liang, et al. Aperture scalable liquid crystal optically duplicated array of phased array[J]. *Optics Communications*, 2019, 451: 174-180.
- [14] De La Tonnay J L D. Engineering liquid crystals for optimal uses in optical communication systems[J]. *Liquid Crystals*, 2004, 31(2): 241-269.
- [15] Buck J, Serati S, Hosting L, et al. Polarization gratings for non-mechanical beam steering applications[C]//Proc of SPIE. 2012: 83950F.
- [16] 肖锋.液晶光学相控阵关键技术研究[D].成都:电子科技大学,2018:3.(Xiao Feng. Research on key technologies of the liquid crystal optical phased array[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2018: 3)
- [17] McManamon P F, Dorschner T A, Corkum DL, et al. Optical phased array technology[C]//Proc of SPIE. 1996, 84(2): 268-298.
- [18] Dorschner T A. Adaptive photonic phased locked elements-an overview[R]. 2007.
- [19] Davis S R, Farca G, Rommel S D, et al. Analog, non-mechanical beam-steerer with 80 degree field of regard[C]//Proc of SPIE. 2008: 69710G.
- [20] Buck J, Serati S, Hosting L, et al. Polarization gratings for non-mechanical beam steering applications[C]//Proc of SPIE. 2012: 83950F.
- [21] Serati S, Hoy C L, Hosting L, et al. Large-aperture, wide-angle nonmechanical beam steering using polarization gratings[J]. *Optical Engineering*, 2017, 56(3):

- 031211.
- [22] Wang Ling. Self-activating liquid crystal devices for smart laser protection[J]. *Liquid Crystals*, 2016, 43(13-15): 2062-2078.
- [23] Schmid A, Papernov S, Li Z W, et al. Liquid-crystal materials for high peak-power laser applications[J]. *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, 1991, 207: 33-42.
- [24] Vladimirov FL, Pletneva NI, Soms LN, et al. Laser-damage resistance of the liquid crystal modulators[J]. *Molecular Crystals and Liquid Crystals Science and Technology Section A*, 1998, 321: 213-221.
- [25] Marshall K L, Saulnier D, Xianyu H, et al. Liquid crystal near-IR laser beam shapers employing photoaddressable alignment layers for high-peak-power applications[C]//Proc of SPIE. 2013: 88280N.
- [26] Raszewski Z, Piecsek W, Jaroszewicz L, et al. Transparent laser damage resistant nematic liquid crystal cell "LCNP3"[J]. *Opto-Electronics Review*, 2014, 22(3): 196-200.
- [27] Tuna O, Selamet 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).
- [28] Wang Haifeng, Huang Zhimeng, Zhang Dayong, 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.
- [29] 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.
- [30] Raszewski Z, Piecsek W, Jaroszewicz L, et al. Laser damage resistant nematic liquid crystal cell[J]. *Journal of Applied Physics*, 2013, 114(5): 053104.
- [31] Liu Xiaofeng, Peng Liping, Gao Yanqi, et al. Laser damage characteristics of indium-tin-oxide film and polyimide film[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2019, 99: 80-85.
- [32] Marshall KL, Gan J, Mitchell G, et al. Laser-damage-resistant photoalignment layers for high-peak-power liquid crystal device applications[C]//Proc of SPIE. 2008: 70500L.
- [33] Xia Gang, Fan Wei, Huang Dajie, et al. High damage threshold liquid crystal binary mask for laser beam shaping[J]. *High Power Laser Science and Engineering*, 2019, 7: 1-6.
- [34] 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.
- [35] Cao Zhaoliang, Mu Quanquan, Hu Lifa, 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.
- [36] Watson E A, Whitaker B, Harris S. Initial high-power-CW-laser testing of liquid-crystal optical phased array[R]. Interim Report, 2005.
- [37] 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: 095603.
- [38] Peng Liping, Zhao Yuanan, Liu Xiaofeng, 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.
- [39] Peng Liping, Zhao Yuanan, Liu Xiaofeng, et al. Investigation on damage process of indium tin oxide film induced by 1064nm quasi-CW laser[C]//Proc of SPIE. 2019: 1106302.
- [40] Zhou Zhuangqi, Wang Xiangru, Zhuo Rusheng, et al. Theoretical modeling on the laser-induced phase deformation of liquid crystal optical phased shifter[J]. *Applied Physics B: Lasers and Optics*, 2018, 124: 35.
- [41] 王东. 基于纯相位液晶空间光调制器的激光束敏捷控制技术[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013: 9. (Wang dong. Research on agility control technology of laser beam by using phase-only liquid crystal spatial light modulator[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology. 2019: 9)
- [42] He Xiaoxian, Wang Xiangru, Wu Liang, et al. Theoretical modeling on the laser induced effect of liquid crystal optical phased beam steering[J]. *Optics Communications*, 2017, 382: 437-443.
- [43] Li J, Gauza S, Wu S T. Temperature effect on liquid crystal refractive indices[J]. *Journal of Applied Physics*, 2004, 96(1): 19-24.
- [44] Li J, Wu S T. Self-consistency of Vuks equations for liquid-crystal refractive indices[J]. *Journal of Applied Physics*, 2004, 96(11): 6253-6258.
- [45] 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. (Zhou Zhuangqi. 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)
- [46] Gu D, Wen B, Mahajan M, et al. High power liquid crystal spatial light modulators[C]//Proc of SPIE. 2006: 630602.