



·激光合束技术·

## 用于高功率密度光束控制的光寻址光阀研制\*

陈一波, 沈浩, 段佳著, 乔冉, 曾建成, 李大鹏, 李玥颖,  
骆永全, 王海峰, 沈志学, 赵祥杰, 张大勇

(中国工程物理研究院 流体物理研究所, 四川 绵阳 621900)

**摘 要:** 为解决光寻址液晶光阀在高功率密度光束控制领域的应用限制, 介绍一种可用于高功率密度激光系统的光寻址液晶光阀, 该光阀开关比不低于 140:1, 可在高于 2300 W/cm<sup>2</sup> 的连续激光系统中正常工作。同时, 所研制的光阀可在高重复吉瓦(GW)级功率密度的 fs 脉冲激光系统中正常工作, 在该系统最大功率密度激光作用下, 光阀未见明显温度变化, 该脉冲激光系统最大平均功率密度超过 300 W/cm<sup>2</sup>。

**关键词:** 光寻址液晶光阀; 光束控制; 高功率密度; 连续激光; 高开关比

中图分类号: TN214

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202335.220203

## Development of optically addressed liquid crystal light valve for high power density beam control

Chen Yibo, Shen Hao, Duan Jiazhu, Qiao Ran, Zeng Jiancheng, Li Dapeng, Li Yueying,  
Luo Yongquan, Wang Haifeng, Shen Zhixue, Zhao Xiangjie, Zhang Dayong

(Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang 621900, China)

**Abstract:** As a beam control device, optically addressed liquid crystal light valve is easy to produce thermal effect due to absorption under the action of high-power density laser, resulting in damage to photoconductive materials, conductive films and liquid crystals. At the same time, thermal effect will also affect the uniformity of the device, reduce the extinction performance of the device. These factors limit the application of the device in laser processing, high power density laser shaping and other fields. To solve the application limitation of optically addressed liquid crystal light valve in the field of high power density beam control, an optically addressed liquid crystal light valve for high power density laser system is developed. The on/off ratio of the light valve is not less than 140:1. It can work normally in the continuous laser system higher than 2300 W/cm<sup>2</sup>. At the same time, the light valve can work normally in the femtosecond pulse laser system with high repetition frequency gigawatt power density. Under the action of the maximum power density laser of the system, the light valve has no obvious temperature change. The maximum average power density of the pulse system exceeds 300 W/cm<sup>2</sup>.

**Key words:** optically addressed liquid crystal light valve, beam control, high power density, continuous laser, high on/off ratio

自美国休斯实验室科学家梅曼宣布获得波长 0.6943 μm 的激光并制备第一台激光器起, 激光成为热门研究对象, 在军事、国防、通信、医学等多个领域得到广泛的应用。随着应用的不断深入, 激光的波矢方向、相位、振幅、光束模式、空间光束质量以及谱宽等光束调控对于实际应用至关重要, 目前激光光束调控技术已成为当今科学界激光研究的热门课题。基于液晶的空间光束调制器(SLM)是目前光束调控的重要研究内容, 可用于光束强度、相位和偏振等信息的精准控制<sup>[1-3]</sup>。由于光寻址液晶空间光调制器在精密光束控制方面有着更高的上限, 因此光寻址液晶空间光调制器的研究对于相关领域具有重要的意义。

\* 收稿日期: 2022-06-17; 修订日期: 2022-10-30

联系方式: 陈一波, ebby-chen@qq.com。

通信作者: 张大勇, zdywx1874@sohu.com;

赵祥杰, zxdouble@gmail.com。

光寻址液晶光阀(OALCLV)是光寻址空间光调制器(OASLM)的一种类型,一般包括光电导材料和液晶材料。基于  $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$  晶体(BSO)和硅作为光电导材料的光寻址空间光调制器已经实现。BSO 是一种良好的感光材料,具有良好的光电导性能和很大的暗态电阻。对于某些波段的光束可以在不影响 BSO 材料光电导性能的条件下几乎无吸收的透过 BSO,还有一些波段的光束可以被 BSO 吸收并引起 BSO 光电性能的变化。在过去的几十年中,光寻址液晶光阀实现了多种光学功能,例如非线性光波混合<sup>[4]</sup>,空间光束整形<sup>[5-7]</sup>,光学图案形成<sup>[8]</sup>,相位共轭<sup>[9]</sup>,非线性光学腔<sup>[10]</sup>,动态全息<sup>[11-13]</sup>,慢光<sup>[14]</sup>,奇异光束操纵<sup>[15]</sup>,干涉测量和光学传感<sup>[16]</sup>等。对于光寻址液晶光阀所实现的的光学功能研究大多集中在功率密度较低的光学系统中,对于光阀高功率密度条件下的光学功能研究与应用存在很大的研究空间,但受限于光阀的损伤阈值和热效应导致的性能变化,因此要求光阀能够耐受更高功率密度的激光、具有较低的热效应和更高的消光性能。本文研制了一种可用于高功率密度激光系统的光寻址液晶光阀,该器件开关比高于 140:1,可在高于  $2300 \text{ W/cm}^2$  的连续激光作用下正常工作,成功实现高功率密度光束的图形化,并在目标靶面得到清晰图案。除此之外,该光阀在最大平均功率密度高于  $300 \text{ W/cm}^2$  的高重频 GW 级功率密度 fs 脉冲激光系统中测试,功能正常且未见明显温升。

### 1 光寻址液晶光阀分压模型

本文研制的光寻址液晶光阀是通过将石英基板、液晶材料、导电膜和 BSO 晶体相关联而制成,如图 1 所示。左边的 BSO 晶体与右边的石英基板形成液晶盒,并在晶体左侧与石英基板左侧沉积透明导电电极。BSO 晶体与石英基板之间灌入液晶材料,形成完整的液晶光阀器件。该器件采用向列相液晶,通过电场调控液晶双折射实现对光束的调控。在寻址光入射前,由于 BSO 晶体巨大的暗态电阻,施加在 BSO 晶体表面的电压无法通过 BSO 晶体内部实现对液晶的电压调控。当寻址光入射到光阀的 BSO 面,BSO 晶体被辐照的部分吸收寻址光,该部分的电导率大幅增加,施加在 BSO 表面的电压通过 BSO 晶体内部,实现对辐照部分对应位置液晶的电压调控。当主激光通过液晶光阀后,寻址光照射部分与未照射部分的液晶对主激光的相位调制产生明显差异,经过检偏装置处理后,两部分光束分离,完成对主激光的调制。根据光寻址光阀的工作原理,液晶层得到的电压大小为液晶状态改变和光束调制的关键,直接影响通过检偏装置到达功率计的光功率。因此,BSO 晶体的分压能力及液晶层得到的电压大小为液晶状态改变和光束调制的关键,直接影响功率计接收到的激光功率。

由于电压驱动频率与分给液晶层的有效电压是液晶电压调控的关键因素,因此对液晶光阀的分压模型的分析有助于得到合适的驱动频率和电压值对应的液晶状态,同时可以与实验数据对比,判定所研制光阀器件与理论模型的差距,差距越大证明所研制的器件与预期偏离越远,性能越差。以 BSO 晶体、液晶层建立等效电路,如图 2 所示。其中,  $R_{LC}$  与  $C_{LC}$  分别为液晶层的电阻与电容,  $R_{\text{dark}}$  是 BSO 的暗电阻,  $R_{\text{light}}$  是 BSO 在均匀写入光照射下的电阻(随写入光强度而改变),  $R_{\text{trap}}$  和  $C_{\text{trap}}$  分别为 BSO 晶体的捕获效应电阻与电容。

从图 2 可以看出,当外部驱动电压为  $V_{AC}$  时,其液晶层分压

$$V_{LC} = \frac{\frac{1}{R_{\text{dark}}} + \frac{1}{R_{\text{light}}} + j\omega C_{\text{BSO}} + \frac{j\omega C_{\text{trap}}}{1 + j\omega R_{\text{trap}} C_{\text{trap}}}}{\frac{1}{R_{\text{dark}}} + \frac{1}{R_{\text{light}}} + j\omega C_{\text{BSO}} + \frac{j\omega C_{\text{trap}}}{1 + j\omega R_{\text{trap}} C_{\text{trap}}} + j\omega C_{LC} + \frac{1}{R_{LC}}} \cdot V_{AC} \quad (1)$$

式中:  $V_{LC}$  为光照时液晶层分得的实际电压,也是调控液晶方向的有效电压。

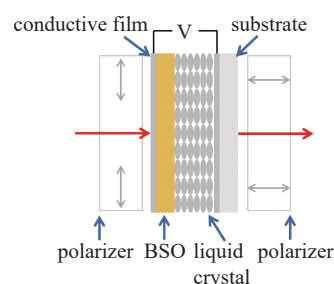


Fig. 1 Schematic diagram of optically addressed liquid crystal light valve  
图 1 光阀器件示意图

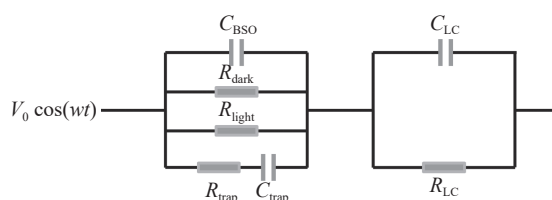


Fig. 2 Equivalent circuit of optically addressed liquid crystal light valve  
图 2 光寻址光阀的等效电路

对于固定参数的 BSO 与液晶，液晶层分得的实际电压取决于外部驱动电压大小和频率。按照公式(1)，对  $V_{LC}$  与  $V_{AC}$  的比值取模，并定义为分压系数  $k$ ，相应的光照  $k_{\text{light}}$  与未光照部分分压系数  $k_{\text{dark}}$  模拟关系如图 3 所示。暗态分压系数是模拟未光照部分的液晶分压比例，当暗态分压系数较大时，调节电压大小容易使得降在液晶层的电压大小超过液晶的启动阈值，导致未光照时，液晶也会受到电压的调控。在图 3(a)中，随着电压频率的增加，未光照部分的分压系数快速降低至最小值并趋于平稳，因此为避免未光照时液晶受到驱动电压调控，在选取液晶的驱动频率时，应不小于 100 Hz，同时要求使用较小的驱动总电压。光照分压系数是模拟光照部分的液晶分压比例，其决定光照条件下，电压对液晶调控的灵敏性，同时也决定驱动液晶所需要的电压大小。在图 3(a)中，所模拟的光照分压系数随着驱动频率的增加而下降，因此驱动频率越小，电压对液晶调控的灵敏性越高和所需驱动总电压越小。光照与未光照条件下的分压系数的差异也是影响驱动效果的重要因素，当分压系数差异太小，未光照部分与光照部分的液晶层分得的电压差异太小，无法对主激光的偏振方向进行明显区分，因此光照与未光照部分的分压系数差异应足够大，所模拟的分压系数差异与频率关系如图 3(b)和图 3(c)所示。图 3(b)为光照与未光照条件分压系数之比与频率的关系图，系数比值随着频率增加，先增加后减小，在 300 Hz 左右到达最高点。图 3(c)为光照与未光照条件分压系数之差与频率的关系图，差值随着频率增加先快速增加后缓慢减小，在 100 Hz 左右出现最大差值。根据分压模型分析并综合上述因素，所研制的液晶光阀器件应选取的驱动频率应为 100~300 Hz 之间。

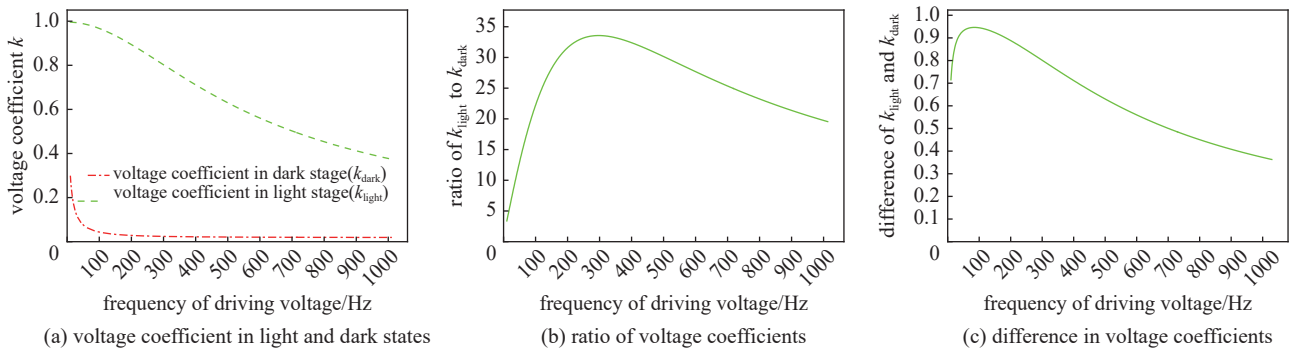


Fig. 3 Voltage relationship between illuminated part and non-illuminated part

图 3 光照与未光照部分分压情况关系图

## 2 实验结果与分析

### 2.1 光寻址液晶光阀的工艺制作

光寻址液晶光阀的工艺流程如图 4 所示。将 1300 °C 烧结 12 h 形成的靶材放入激光脉冲沉积系统中，利用波长 248 nm、频率 5 Hz、能量密度 0.5 J/cm<sup>2</sup> 的准分子激光作用靶材，沉积得到带膜基板，沉积温度为 450 °C，旋转靶材与基板距离 50 mm，沉积后的基板经退火处理，得到稳定的带膜基板。在筛选无损伤、膜层均匀的基板并清洁后，对基板膜层进行热处理，处理温度为 230 °C。将处理后的基板进行 PI 旋涂，旋涂转速为 4000 rpm，随后再次对基板进行 230 °C 热处理。PI 固化后利用摩擦绒布在 800 rpm 转速下进行摩擦取向。液晶盒成盒方式为反平行成盒，成盒时所采用的温度条件为 120 °C，同时施加 0.3 MPa 的均匀压力，所制液晶盒在光照下无干涉条纹。液晶光阀采用向列相液晶，在低于 10 Pa 的真空环境下注入液晶，随后通过 0.1 MPa 的压力修正液晶盒各位置盒厚，所得到的液晶光阀在偏振片测试下各位置几乎一致。

### 2.2 器件分压系数、均匀性与消光性能测试及分析

在器件的功能与性能测试中，测试使用的主激光波长包括 1030 nm、1053 nm 和 1064 nm 等，寻址光波长包括 459 nm 和 473 nm 等，得到了相似的测试结果，因此本文以主激光波长 1064 nm、寻址光波长 473 nm 的测试为主进行分析。图 5 为器件测试原理光路图，主要由主激光光路和寻址光光路构成。主激光起于 1064 nm 偏振激光器，经再次偏振处理并通过分光镜射入光阀，经光阀调制后，通过偏振分光，在功率计或靶面得到目标光束。寻址光经分光镜反射到光阀的 BSO 面，可通过调节寻址光功率改变 BSO 晶体的电导率，同时可通过改变寻址光图案改变寻址光在 BSO 面上的分布。

根据光寻址液晶光阀分压原理，在 473 nm 光束照射下，通过获取不同电压频率下的主激光功率，得到不同电

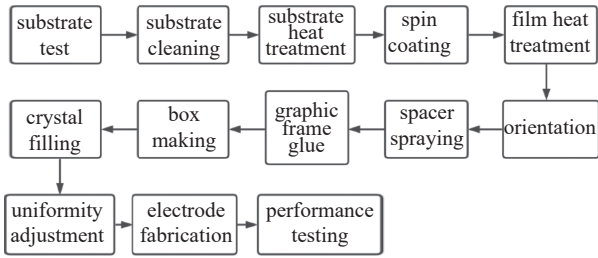


Fig. 4 Process flow chart

图 4 工艺流程图

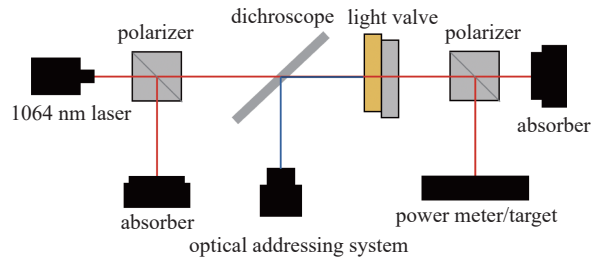


Fig. 5 Schematic diagram of test optical path

图 5 测试光路原理图

压频率的分压系数  $k$  的曲线并与模拟曲线进行对比,如图 6 所示。在光照条件下,频率 100~1000 Hz 范围内的实验数据计算获得的分压系数与模拟得到的分压系数随频率变化趋势一致,符合性较好。该结果说明液晶光阀的外接驱动电压对液晶的调控效果与模拟情况一致,反映了所研制的液晶光阀各参数性能与预期相符。

要想实现光束的精确控制,液晶光阀的均匀性十分关键。液晶光阀的不均匀直接影响光束能量分布,导致得到的光束与附载到光束中的信息不一致,特别是在高功率密度激光系统引入热效应后,光束的调控变得更为复杂。例如在激光加工中,均匀性不够直接导致烧蚀程度不一致。在主激光与寻址光共同作用下,光束通过起偏器、光阀与检偏器后到达功率计,得到不同点位接收的功率测试结果如图 7 所示。在寻址光作用下,主激光通过光阀上水平间隔 1 mm 的不同位置后,测得的最高功率为 90.2 mW,最高功率偏离平均值 0.884%,最低功率为 88.6 mW,最低功率偏离平均值 0.906%,标准差为 0.491,所研制的液晶光阀器件在各点具有很好的一致性。

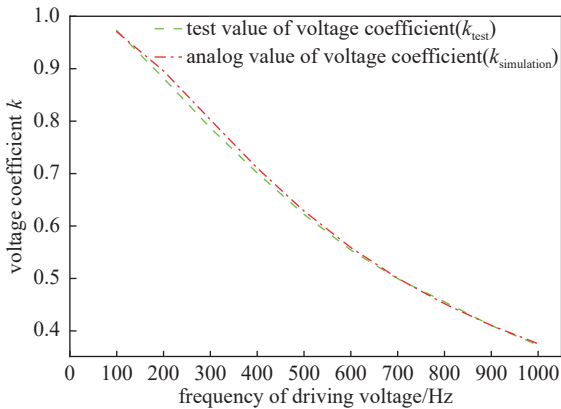


Fig. 6 Comparison diagram of voltage coefficient between experiment and simulation

图 6 实验与模拟分压系数对比图

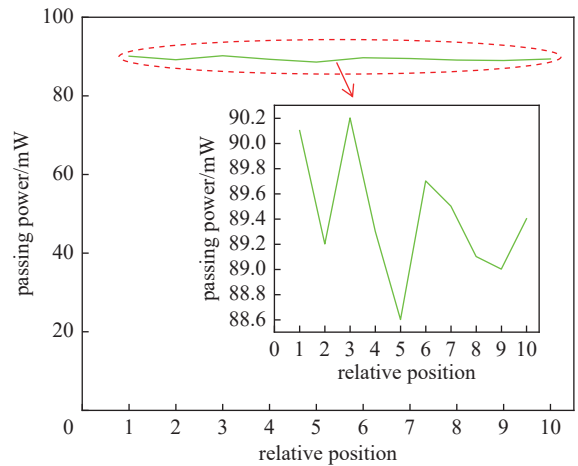
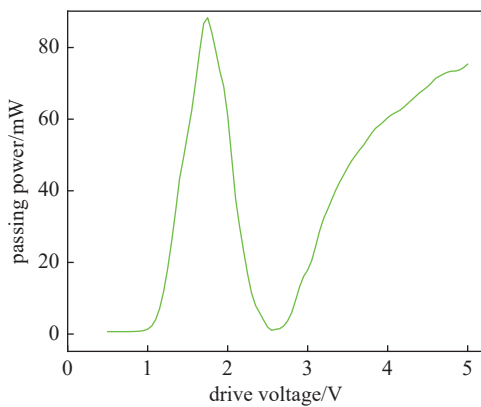


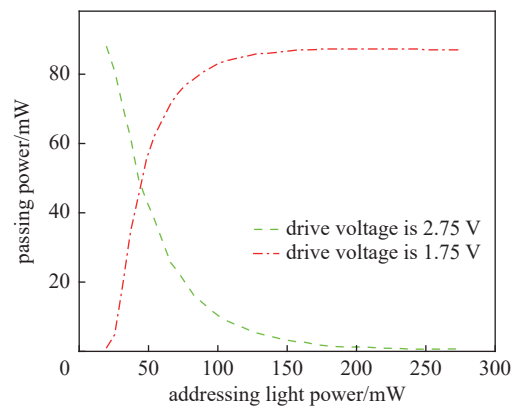
Fig. 7 Uniformity test diagram of light valve

图 7 光阀均匀性测试图

透光与消光是液晶光阀的重要功能,该性能指标是液晶光阀功能评判的核心要素之一。图 8 为液晶光阀的消光功能测试图,主要包括液晶光阀的电压调控与寻址光调控。当单点主激光光束和寻址光入射到液晶光阀上,通



(a) passing power varies with voltage



(b) passing power varies with addressing light power

Fig. 8 Extinction function test diagram of light valve

图 8 光阀消光功能测试图

过调节寻址光功率和驱动电压大小可以实现对液晶方向的调控,从而实现对主激光偏振方向的调节,液晶光阀与后面的偏振器共同决定光束透过率。如图 8(a)所示,功率计接收到的主激光光束功率随电压增加依次经历上升、下降、再上升的过程,且电压调控实现了对主激光透过率大小的  $2\pi$  调制。图 8(b)展示了调节寻址光功率实现的透光与消光功能,随着寻址光功率从 20 mW 增加到 270 mW,接收的主激光功率也随之变化,最后趋于平稳。该测试分别选择了 1.75 V 和 2.75 V 作为电压条件,对应于图 8(a)中两种相反的光阀状态。当电压定为 1.75 V,初始寻址光功率 20 mW 时,由于 BSO 晶体电阻较大,导致分在液晶层的电压较小,略低于达到液晶的调控阈值,因此无法实现电压调控。随着寻址光功率的增加,BSO 晶体受到寻址光照射,电导率增加,分在液晶层的电压增加,电压逐步对液晶方向进行调控,功率计接收的主激光功率随寻址光功率增加而增加,随着寻址光功率越来越高,BSO 晶体的光电导增加到最大值,分在液晶层的电压保持不变,接收到的主激光的光功率保持稳定。当电压定为 2.75 V 时,在相同初始寻址光条件下,液晶层分得的电压已经超过液晶的调控阈值,实现对光束的调控,并且光阀在该状态下,功率计接收的主激光功率为最高值。随寻址光功率增加,功率计接收的主激光功率开始下降,随着 BSO 晶体的光电导增加到最大值,液晶层接收的电压值不再发生变化,功率计接收到的主激光的光功率保持稳定。功率计接收光功率最大为 90 mW,最小为 0.6 mW,所研制的液晶光阀的单点激光开关比为 150:1。将主激光光束直径扩束至 8 mm,开关比仍高于 140:1,这依赖于液晶光阀良好的均匀性。

所研制的光寻址液晶光阀的优异性能源于多个工艺步骤。除了基板与膜层的高度均匀以外,120 °C 条件下施加的 0.3 MPa 均匀压力,以及 0.1 MPa 的修正压力,保证了所研制的液晶光阀的均匀性与消光性能,同时保证了液晶盒各位置盒厚与模型分析中所取盒厚的一致性。

### 2.3 高功率密度激光下的光阀性能测试与分析

在未采取任何冷却手段的条件下,所研制的液晶光阀器件在高于  $2300 \text{ W/cm}^2$  的连续激光作用下,10 s 内的最高温度为  $31.6 \text{ }^\circ\text{C}$ ,温升  $6.6 \text{ }^\circ\text{C}$ ,光阀热成像图及  $2300 \text{ W/cm}^2$  连续激光作用下温升曲线如图 9 所示,所研制的光阀器件能正常工作且未见损伤。该测试使用激光器直接照射,激光功率为 352 W,作用时间为 10 s,光斑直径 4.4 mm,其中激光功率由功率计直接采集,光斑直径由光斑仪直接测得。在 kW 级功率密度激光作用下,光阀透过率高于 80%,这与弱光下的测试值相当,开关比超过弱光时的 70%。激光作用相距 3 mm 的两点,接收的功率偏离平均值均小于 1%。此外,该光阀器件在最大平均功率密度大于  $300 \text{ W/cm}^2$  的高重频 GW fs 脉冲激光系统中使用,3 min 未见器件有明显的温度变化。器件较低的温升使得液晶光阀在高功率密度连续激光或高平均功率密度脉冲激光下工作成为可能。

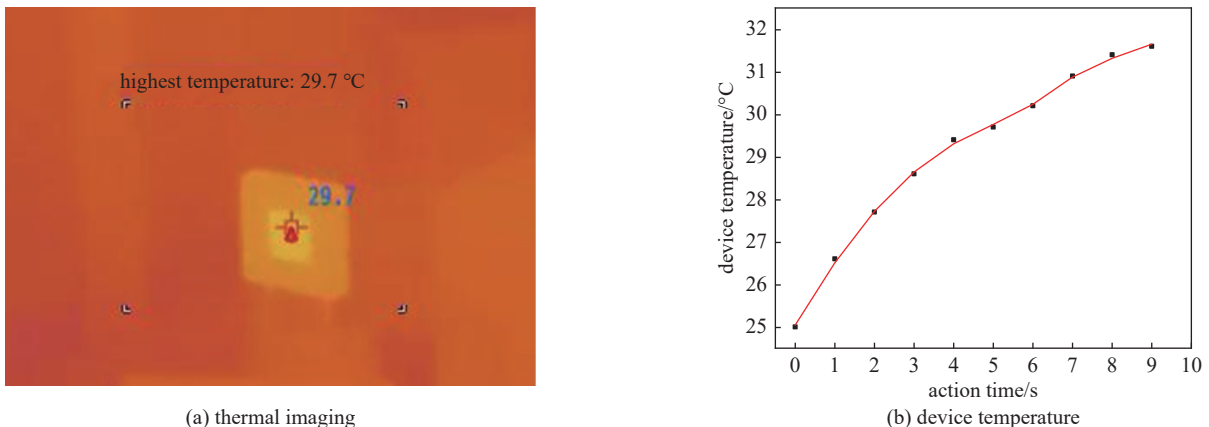


Fig. 9 Thermal imaging diagram and device temperature under the action of high power density continuous laser

图 9 高功率密度连续激光作用下的热成像图及温升曲线

图 10 为激光作用引起的温度变化对光阀相位调制性能的影响对比图,在激光作用引起的温度变化到达  $10 \text{ }^\circ\text{C}$  后,调制曲线与温度升高前几乎重合,温升  $10 \text{ }^\circ\text{C}$  引起的变化量约为 1%。

图 11 为液晶光阀对高功率连续激光的图形化功能测试结果。寻址光经过扩束成像系统后作用于液晶光阀,在光阀上形成“火”字图案。光功率为 710 W 的主激光光束通过偏振分光棱镜作用于液晶光阀。调节光阀驱动电压,使得图形覆盖部分实现消光效果,经过图形化的主激光作用于目标靶面,得到烧蚀图案“火”。从图中得到,主激光烧蚀靶面留下的图案清晰且与寻址光所携带的“火”字图案基本一致,如图 11(a)所示。图 11(b)为液晶光阀

对 kW 级功率密度主激光的图形调制, 调节光阀驱动电压, 使得图形覆盖部分实现透光效果, 调制图案为圆环, 在红砖上烧蚀出圆环效果, 圆环图案清晰、均匀。该测试结果验证了所研制的光寻址液晶光阀在高功率密度激光整形、加工等系统中应用的可行性, 为相关领域的发展提供支持。

所研制的液晶光阀能在高功率密度下正常工作主要依赖于液晶光阀构成材料的低吸收。在高功率密度激光作用下, 液晶光阀的构成材料均有一定的温升, 在制成器件后, 温度累积效应更为明显, 直接导致 BSO 晶体材料因瞬时温度过高和受热不均匀而碎裂, 因此同时提高各组成部分的强激光耐受, 降低材料吸收是光阀抗损伤的关键。图 12 为 400 nm 到 1200 nm 波长下各材料的吸收曲线, BSO 晶体在 400 nm 具有很强的吸收, 随着波长增加, 吸收逐渐降低, 波长超过 550 nm, 透过率趋于平稳, 波长 1000 nm 左右相对于 800 nm 的透过率进一步提升, 如图 12(a) 所示, BSO 晶体在所用激光波段具有更低的吸收, 强激光耐受性能得到提升。液晶材料在 400 nm 到 1200 nm 总体吸收率较低, 但将吸收曲线放大后能够看出, 在波长 1100 nm 左右, 该液晶材料相较于其他波段具有更低的吸收, 如图 12(b) 所示, 这是由于抑制了液晶材料在该波段下的共振吸收。采用新工艺方法处理的导电膜相较于普通高损伤膜, 在吸收方面具有一定的优势, 如图 12(c) 所示。宽范围内的高透光区使得该膜层在波长 1000 nm 到 1200 nm 有更加良好的表现, 能够改善高功率连续激光的耐受性能。

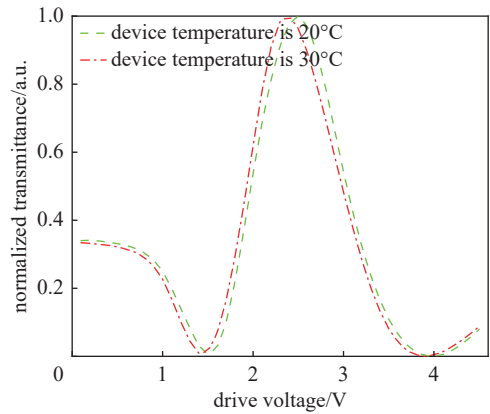
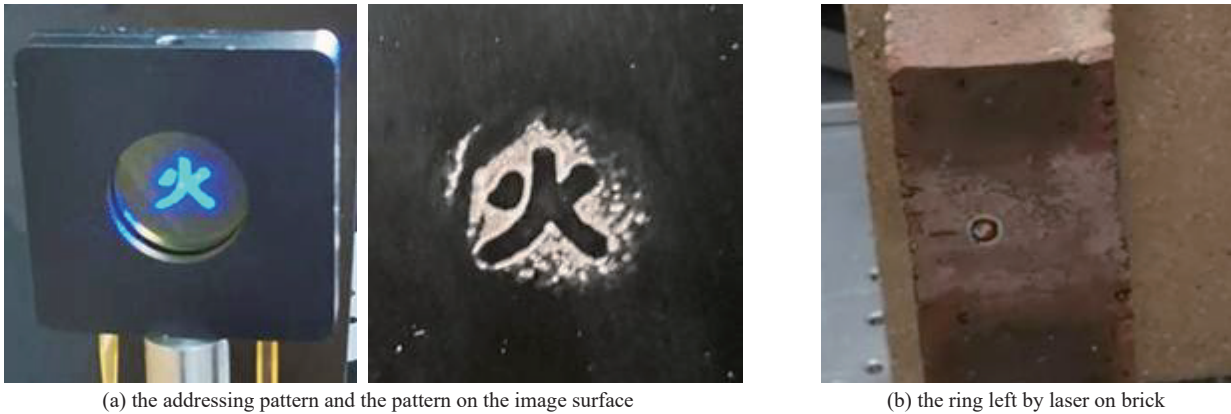


Fig. 10 Effect of temperature change on the modulation curve caused by the action of high power density laser

图 10 高功率密度激光作用引起温度变化对调制曲线的影响

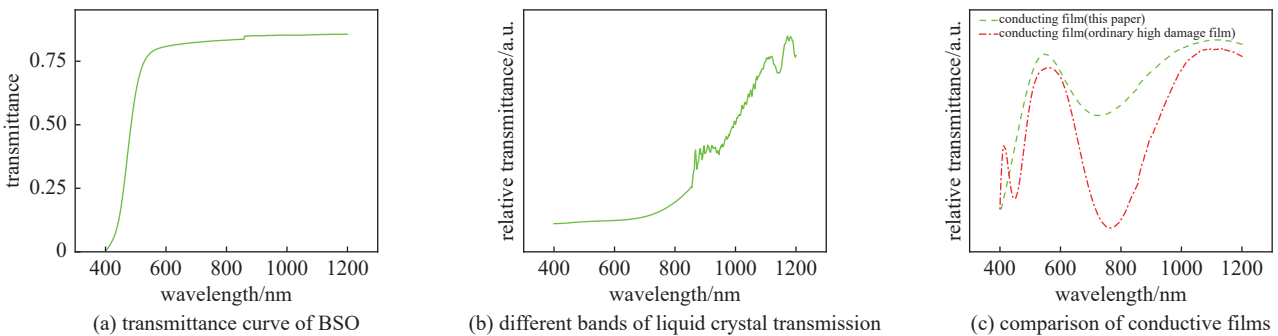


(a) the addressing pattern and the pattern on the image surface

(b) the ring left by laser on brick

Fig. 11 Graphical images of high power density CW laser

图 11 高功率密度连续激光的图形化效果图



(a) transmittance curve of BSO

(b) different bands of liquid crystal transmission

(c) comparison of conductive films

Fig. 12 Absorption curves at different wavelengths

图 12 不同波长下的吸收曲线

对于独立的各组成部分, 已有关于其大量的抗损伤机理与性能的研究<sup>[17-18]</sup>, 同时降低各组成部分的吸收, 并基于此提高器件抗损伤性能仍是高功率密度激光液晶调控器件的缺口, 这也是大量液晶器件无法用于 kW 级功率密度激光系统的主要因素。在研制过程中, 采用新靶材研制和工艺优化等方法大幅降低了带膜 BSO 晶体材料及带

膜基板的吸收,提高了该部分材料的稳定性,大大降低高功率密度激光接触时短时间内的温度变化。kW级功率密度的连续激光耐受性能不仅为液晶光阀用于高功率密度连续激光整形、调控、加工等系统提供支持,也为液晶光阀用于高平均功率、高重复频率的脉冲激光系统提供支持。

### 3 结 论

本文对所研制的光寻址液晶光阀器件的工艺、性能进行了报道,该器件可用于高功率密度连续激光系统和高平均功率、高重复频率的脉冲激光系统,在未采取任何冷却手段条件下,可在高于 $2300\text{ W/cm}^2$ 的连续激光下正常工作,相关成果鲜有报道。该器件具有很高的均匀性,对于直径 $1.5\text{ mm}$ 光斑作用下开光比不低于 $150:1$ ,直径 $8\text{ mm}$ 的光斑作用下开关比高于 $140:1$ ,这依赖于高均匀性、高压力的修正。该器件能够为光寻址液晶光阀在高功率密度激光的整形、光束控制和加工等领域的应用提供支持。此外,可用于超过 $3000\text{ W/cm}^2$ 连续激光系统的光寻址液晶光阀已经完成强激光耐受性能测试,将在后续工作中进行进一步研究。

### 参考文献:

- [1] Li Shiqiang, Xu Xuewu, Veetil R M, et al. Phase-only transmissive spatial light modulator based on tunable dielectric metasurface[J]. *Science*, 2019, 364(6445): 1087-1090.
- [2] Zola R S, Bisoyi H K, Wang Hao, et al. Dynamic control of light direction enabled by stimuli-responsive liquid crystal gratings[J]. *Advanced Materials*, 2019, 31: 1806172.
- [3] Komar A, Paniagua-Domínguez R, Miroschnichenko A, et al. Dynamic beam switching by liquid crystal tunable dielectric metasurfaces[J]. *ACS Photonics*, 2018, 5(5): 1742-1748.
- [4] Brignon A, Bongrand I, Loiseaux B, et al. Signal-beam amplification by two-wave mixing in a liquid-crystal light valve[J]. *Optics Letters*, 1997, 22(24): 1855-1857.
- [5] Sanner N, Huot N, Audouard E, et al. Programmable focal spot shaping of amplified femtosecond laser pulses[J]. *Optics Letters*, 2005, 30(12): 1479-1481.
- [6] Huang Dajie, Fan Wei, Li Xuechun, et al. Beam shaping for 1 053-nm coherent light using optically addressed liquid crystal light valve[J]. *Chinese Optics Letters*, 2012, 10: S21406.
- [7] Heebner J, Borden M, Miller P, et al. A programmable beam shaping system for tailoring the profile of high fluence laser beams[C]//Proceedings of SPIE 7842, Laser-Induced Damage in Optical Materials: 2010. 2010.
- [8] Bortolozzo U, Residori S, Petrosyan A, et al. Pattern formation and direct measurement of the spatial resolution in a photorefractive liquid crystal light valve[J]. *Optics Communications*, 2006, 263(2): 317-321.
- [9] Bortolozzo U, Residori S, Huignard J P. Self-pumped phase conjugation in a liquid crystal light valve with a tilted feedback mirror[J]. *Optics Letters*, 2007, 32(7): 829-831.
- [10] Bortolozzo U, Montina A, Arecchi F T, et al. Spatiotemporal pulses in a liquid crystal optical oscillator[J]. *Physical Review Letters*, 2007, 99: 023901.
- [11] Bortolozzo U, Residori S, Huignard J P. Adaptive holography in liquid crystal light-valves[J]. *Materials*, 2012, 5(9): 1546-1559.
- [12] Peigné A, Bortolozzo U, Residori S, et al. Adaptive holographic interferometer at  $1.55\text{ }\mu\text{m}$  based on optically addressed spatial light modulator[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(23): 5482-5485.
- [13] Peigné A, Bortolozzo U, Residori S, et al. Adaptive interferometry for high-sensitivity optical fiber sensing[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2016, 34(19): 4603-4609.
- [14] Bortolozzo U, Residori S, Huignard J P P. Slow and fast light: basic concepts and recent advancements based on nonlinear wave-mixing processes[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2010, 4(4): 483-498.
- [15] Lenzini F, Residori S, Arecchi F T, et al. Optical vortex interaction and generation via nonlinear wave mixing[J]. *Physical Review A*, 2011, 84: 061801.
- [16] Bortolozzo U, Residori S, Howell J C. Precision Doppler measurements with steep dispersion[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(16): 3107-3110.
- [17] 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.
- [18] 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.