

文章编号: 1001-3806(2010)03-0392-03

液晶光学器件激光损伤研究

骆永全, 张大勇, 张翠娟, 罗飞, 沈志学, 刘海涛
(中国工程物理研究院 流体物理研究所, 绵阳 621900)

摘要: 为了实现液晶光学器件在高功率固体脉冲激光装置上的应用, 采用理论模拟和实验相结合的方法研究了液晶光学器件的激光损伤情况, 建立了液晶光学器件激光损伤的物理模型, 计算了一定入射激光能量密度下液晶光学器件的温度场分布和损伤情况, 测量了液晶光学器件中聚酰亚胺薄膜和液晶材料的激光损伤阈值, 得到了液晶光学器件的激光损伤机理和损伤阈值。结果表明, 液晶光学器件的激光损伤主要源于组成液晶光学器件的聚酰亚胺薄膜和液晶材料因温度升高导致的破坏, 通过液晶光学器件结构的合理设计和物理参数的选择可以提高其抗激光损伤能力。

关键词: 激光光学; 激光损伤; 抽运-探测; 液晶光学器件

中图分类号: O753+.2 **文献标识码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1001-3806.2010.03.030

Research of laser damage on liquid crystal optical elements

LUO Yong-quan, ZHANG Da-yong, ZHANG Cui-juan, LUO Fei, SHEN Zhi-xue, LIU Hai-tao
(Institute of Fluid Physics, Chinese Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

Abstract: In order to apply liquid crystal optical elements in high power solid pulsed laser facility, the laser damage on liquid crystal optical elements was studied based on simulation and experiments. The physical mode of laser thermal damage on liquid crystal optical elements was built and temperature distribution was calculated at certain incident laser energy density, the laser damage threshold of the polyimide film and liquid crystal material were measured and the laser damage mechanism and threshold of the liquid crystal optical elements were attained. The results indicate that laser damage on the liquid crystal optical elements mainly origin from the decomposition of liquid crystal material and polyimide film under the laser induced high temperature conditions, the laser damage threshold could be improved through optimizing their structural and physical parameters.

Key words: laser optics; laser damage; pump-probe; liquid crystal optical elements

引言

液晶光学器件的发展始于1979年^[1-3], 当时的晶体材料难以满足高功率固体激光器对光学元件的大口径要求, 人们发现, 利用向列相液晶的流动性和光学各向异性可以制成大口径的液晶光学器件, 有望满足高功率固体激光器对大口径光学元件的需求。在液晶光学器件的应用方面, 最具代表性的是美国Rochester大学和日本大阪大学, 其中Rochester大学在60路的OMEGA激光装置中使用了超过300个液晶光学器件。

液晶光学器件除了具有大的通光口径和特定光学性能外, 还必须具备高的激光损伤阈值才能用于高功

率固体脉冲激光装置上。作者对液晶光学器件的激光损伤进行了理论分析和实验研究, 建立了液晶光学器件的热物理损伤模型, 计算了一定入射激光能量密度下器件的温度场分布和损伤情况, 进行了相关实验研究。

1 物理模型和计算结果

液晶光学器件的结构如图1所示。

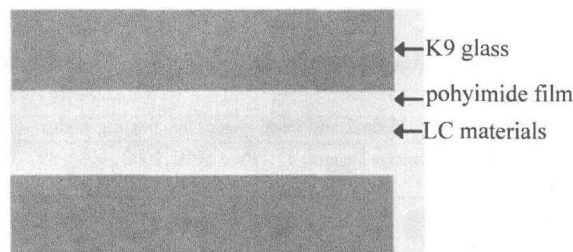


Fig. 1 structure of liquid crystal optical elements

液晶光学器件由光学玻璃基板(K9玻璃)、聚酰亚胺薄膜和液晶(liquid crystal, LC)材料组成。聚酰亚胺是一种有机物, 在液晶器件中的厚度为50nm ~

基金项目: 中国工程物理研究院重点基金资助项目 (2007A01003)

作者简介: 骆永全(1974-), 男, 助理研究员, 从事液晶光学器件技术的研究。

E-mail: uestcaep@gmail.com

收稿日期: 2009-03-19; 收到修改稿日期: 2009-09-07

120nm,主要功能是对液晶分子取向,当其温度上升到 360℃~450℃时,会发生分解,从而失去取向功能;液晶材料是一种混合物,当温度上升到其清亮点温度(65℃)时,液晶材料会从各向异性变为各向同性,导致液晶器件短时间失效,当温度超过 300℃后,液晶材料会发生气化、分解以至碳化从而导致材料的破坏和液晶器件的永久失效。由于聚酰亚胺和液晶材料都是有机物,在和纳秒脉宽的激光相互作用时,主要考虑热效应导致的器件损伤和破坏。

入射激光为高斯光束,其强度分布可表示为^[4]:

$$I_1 = I_0 \exp\left(-\frac{r^2}{r_{1S}^2}\right) \quad (1)$$

式中, I_0 为出射光强, r 为光斑变量, r_{1S} 为液晶器件表面上的光斑半径。

液晶器件不同厚度 z 处的光强分布为^[4]:

$$I(r_i, z_i, t) = I_1 e^{-\beta z_i} \quad (2)$$

液晶器件吸收入射激光能量转化为热能,在考虑器件的热传导问题时可作为内热源来处理,则该处单位时间、单位体积内材料吸收的能量(生热率)为^[4]:

$$q_i(r_i, z_i, t) = \beta I(r_i, z_i, t) = \beta I_0 \exp\left(-\frac{r^2}{r_{1S}^2}\right) e^{-\beta z_i} \quad (3)$$

式中, β 为液晶器件对入射激光波长的吸收系数。(3) 式为使用 ANSYS 程序计算单元网格所加的热载,结合绝热边界条件和时间 $t=0$, 温度变化 $\Delta T=0$ 的初始条件,即可求得不同入射激光能量密度下,液晶光学器件的温度场分布^[4-7]。液晶光学器件的热物理参量^[8-9] 如表 1 所示,激光波长为 1064nm,脉宽 10ns,在单脉冲入射的情况下,液晶光学器件的温度场分布的计算结果如图 2 所示。

Table 1 Thermal constant of LC elements

materials	K9 glass	polyimide film KPI-600	LC material OBLC-10000
absorption coefficient α/cm^{-1}	0.01	0.019	0.1
refractive index n	1.52	1.60	1.49
density $\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	2.51	1.35	1.02
specific heat capacity $c_p/(\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	2.0	1.1	1.8
thermal conductivity $\kappa/(\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	0.014	0.0028	0.005

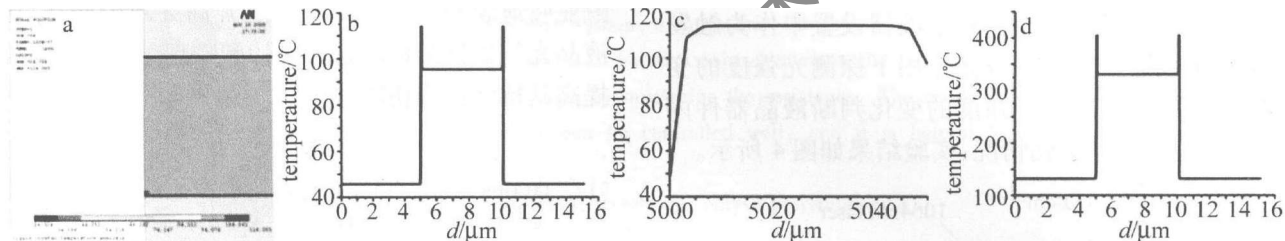


Fig. 2 Temperature distribution of LC elements

图 2a、图 2b、图 2c 分别为入射激光能量密度为 $5\text{J}/\text{cm}^2$ 时,液晶光学器件的总体温度场分布以及液晶光学器件和聚酰亚胺薄膜厚度方向的温度场分布;图 2d 为入射激光能量密度为 $20\text{J}/\text{cm}^2$ 时,液晶光学器件厚度方向的温度分布情况。当入射激光能量密度为 $5\text{J}/\text{cm}^2$ 时,聚酰亚胺薄膜材料的最高温度为 115°C ,液晶材料的温度为 96°C ,超过了其清亮点温度,变为各向同性,液晶器件会暂时失效,由于温度变化和纳秒脉冲激光相比是一个慢过程,因此,不会影响液晶光学器件对单脉冲激光的使用。当入射激光能量密度增大到 $20\text{J}/\text{cm}^2$ 时,液晶材料的最高温度为 320°C ,聚酰亚胺薄膜的最高温度为 402°C ,分别达到了各自的破坏温度,导致液晶光学器件的永久性破坏。

2 实验结果

针对液晶光学器件激光损伤的薄弱环节,分别对液晶光学器件中的聚酰亚胺薄膜和液晶材料的激光损伤进行了实验研究。

首先,将聚酰亚胺(KPI-600)溶液均匀地涂敷在玻

璃平板的表面,经高温固化后在玻璃表面形成一层厚度在 100nm 左右的聚酰亚胺薄膜,在波长 1064nm 、脉宽 10ns 的单脉冲激光的辐照下,测量了不同入射激光能量密度下聚酰亚胺薄膜的损伤情况,实验数据如表 2 所示。

Table 2 The laser damage data of polyimide film

order number	energy density/ ($\text{J} \cdot \text{cm}^{-2}$)	experimental number	damage probability/%
1	13	10	0
2	15	10	0
3	17	10	10
4	18	10	30
5	19	10	70
6	20	10	90
7	25	10	100

从表 2 可以得到,随着入射激光能量密度的增加,聚酰亚胺薄膜的损伤概率也越来越大。激光能量密度小于 $15\text{J}/\text{cm}^2$ 时,薄膜没有损伤;当激光能量密度从 $17\text{J}/\text{cm}^2$ 增加到 $20\text{J}/\text{cm}^2$ 时,损伤概率从 10% 增加到 90%;激光能量密度进一步增加到 $25\text{J}/\text{cm}^2$ 时,薄膜完全损坏。因此,聚酰亚胺薄膜的激光损伤阈值应该在

15J/cm² 以上。

另外,使用抽运-探测技术^[10]和显微镜相结合的方法研究了强激光作用下,液晶材料的损伤情况,实验光路如图3所示。

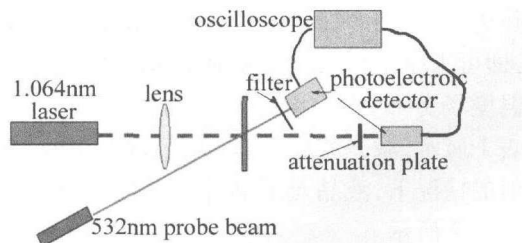


Fig. 3 Experimental setup

液晶材料 OBLC-10000 (西安近代化学研究所研制)被直接灌注到没有涂敷聚酰亚胺取向膜的空液晶盒中。波长为 1064nm、脉宽为 10ns 的单脉冲激光在液晶材料上聚焦为直径 2mm 的光斑,经衰减片衰减后入射到光电探测器上。同时,使用波长 532nm、光斑直径 8mm 的连续光作为探测光照射到液晶材料上,并将脉冲激光的光斑完全覆盖,经滤光片后照射到光电探测器上。脉冲激光信号作用于光电探测器后产生的电信号经示波器收集处理后,在示波器设置中作为触发源,触发示波器采集脉冲激光作用下探测光强度的变化情况,根据探测光信号强度的变化判断液晶器件内部液晶材料的光学损伤情况,实验结果如图4所示。

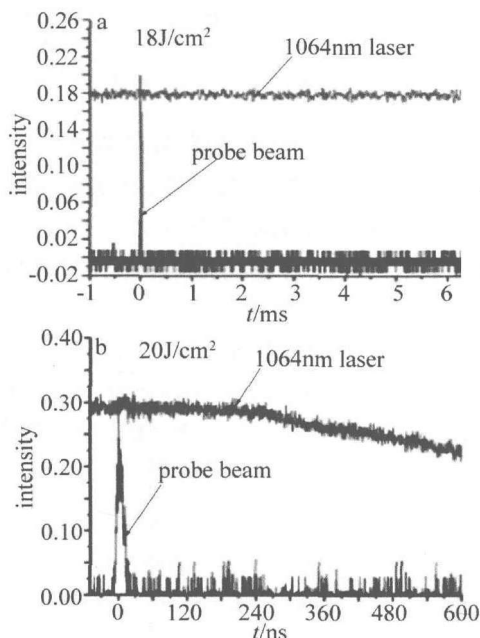


Fig. 4 Experimental results

图4a中,入射激光能量密度为 18J/cm² 时,主激光脉冲过后,探测光强度没有发生变化,表明液晶器件内部没有发生光学损伤从而引起探测光透过强度的变化;图4b中,入射激光能量密度增加到 20J/cm² 时,主激光脉冲过后 200ns,探测光强度发生了明显的衰减,表明液晶材料发生了光学损伤,引起了探针光透过强

度的降低。当入射激光能量密度达到 25J/cm² 以上时,通过上海宙山精密光学仪器有限公司生产的 XP-203 偏光显微镜观测了液晶材料内部的损伤情况,具体结果如图5所示。



Fig. 5 Laser damage on LC material

在液晶材料和激光光斑作用区域内,观测到了气泡和黑色碳化物(旋转检偏器的方向,碳化物的颜色不发生改变),主要是由于激光和液晶材料相互作用,温度升高导致液晶材料的气化和碳化形成的。

3 小结

通过理论模拟和实验结合的方法研究了强激光作用下,液晶光学器件的激光损伤情况,结果表明:液晶光学器件的激光损伤主要源于组成液晶光学器件的聚酰亚胺薄膜和液晶材料因温度升高导致的破坏,通过液晶光学器件结构的合理设计和物理参数的选择可以提高其抗激光损伤能力。

参考文献

- [1] JACOBS S D, CERQUA K A, MARSHALL K L, *et al.* Liquid crystal laser optics: design, fabrication, and performance [J]. *J O S A*, 1988, B5(9):1962-1979.
- [2] KOREN E M, JACOBS S D, HOUGHTON J K, *et al.* Nematic polymer liquid-crystal wave plate for high-power lasers at 1054nm [J]. *Appl Opt*, 1994, 33(10):1889-1899.
- [3] SHARP R C, RESLER D P, HOBBS D S, *et al.* Electrically tunable liquid-crystal wave plate in the infrared [J]. *Opt Lett*, 1990, 15(1):87-89.
- [4] ZHOU W J. Study on temperature regularity and damage effect of thin-film component irradiated by laser [M]. Mianyang: Southwest Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics Press, 2005:34-48 (in Chinese).
- [5] COHEN S S, BERNSTEIN J B, WYATT P W. The effect of multiple laser pulse on damage to thin metallic films [J]. *Appl Phys*, 1992, 71(2):630-637.
- [6] MANSURIPUR M, NEVILLE CONNELL G A, GOODMAN J W. Laser-induced local heating of multilayer [J]. *Appl Opt*, 1982, 21(6):1106-1114.
- [7] ONG H L. Optically induced Fredericksz transition and bistability in a nematic liquid crystal [J]. *Phys Rev*, 1983, A28(4):2393-2407.
- [8] YANG D K, WU Sh T. Fundamentals of liquid crystal devices [M]. Hoboken: John Wiley & Sons Ltd, 2006:157-175.
- [9] COLLINGS P J, HIRD M. Introduction to liquid crystals chemistry and physics [M]. Bristol: Taylor & Francis Ltd, 1997:147-176.
- [10] LUO Y Q, WANG W P, LI J F. Investigation of an optical limiting mechanism in carbon nanotube suspension [J]. *Laser Technology*, 2007, 31(1):44-46 (in Chinese).