



DOI: 10.12086/oe.2021.200463

## 温度诱导液晶相控光束质量恶化分析

黄帆<sup>1</sup>, 汪相如<sup>1\*</sup>, 贺晓娴<sup>1</sup>, 张梦雪<sup>1</sup>, 王影丽<sup>1</sup>,  
郭弘扬<sup>2</sup>, 胡婕<sup>2</sup>, 马浩统<sup>2</sup>

<sup>1</sup>电子科技大学光电科学与工程学院, 四川 成都 611731;

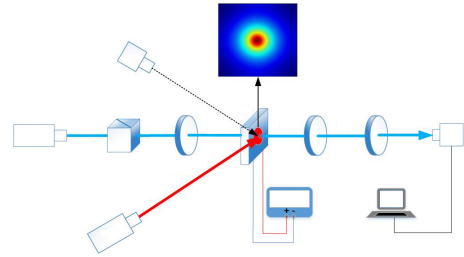
<sup>2</sup>中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209

**摘要:** 液晶光学相控阵是下一代光束控制技术的核心器件, 提高其耐受激光阈值是当前研究的热点之一。针对较高功率激光入射场景下评测液晶光学相控阵相位调制性能恶化程度的问题, 本文基于传统四分之一波片法, 实现快速、直接测量液晶对入射激光的相位调制量。验证试验发现, 当中心温度为 33 °C 时, 对应的最大畸变相位为 3.6 rad。同时, 本文基于该实测相位调制结果, 研究出射光的光束质量恶化过程。分析结果表明: 当液晶移相器的中心温度变化小于 10 °C 时, 光束质量恶化小于 20%。

**关键词:** 液晶光学相控阵; 高功率激光; 相位恶化; 光束质量

**中图分类号:** O436.4

**文献标志码:** A



黄帆, 汪相如, 贺晓娴, 等. 温度诱导液晶相控光束质量恶化分析[J]. 光电工程, 2021, 48(6): 200463

Huang F, Wang X R, He X X, et al. Analysis of temperature-induced liquid crystal phase control beam quality deterioration[J].

*Opto-Electron Eng*, 2021, 48(6): 200463

## Analysis of temperature-induced liquid crystal phase control beam quality deterioration

Huang Fan<sup>1</sup>, Wang Xiangru<sup>1\*</sup>, He Xiaoxian<sup>1</sup>, Zhang Mengxue<sup>1</sup>, Wang Yingli<sup>1</sup>,  
Guo Hongyang<sup>2</sup>, Hu Jie<sup>2</sup>, Ma Haotong<sup>2</sup>

<sup>1</sup>School of Optoelectronic Science and Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 611731, China;

<sup>2</sup>Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China

**Abstract:** The liquid crystal optical phased array (LCOPA) is the core device of next-generation beam control technology. Improving its laser-induced damage threshold is one of the current research hot spots. Aiming at the scene of higher power laser incidence, the degradation degree of LCOPA phase modulation performance should be evaluated. Based on the traditional quarter-wave plate method, this paper realizes fast and direct measurement of the phase modulation of the liquid crystal to the incident laser. The verification test found that when the core temperature is

收稿日期: 2020-12-16; 收到修改稿日期: 2021-04-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61775026,61871031); 国家重点研发计划(2018YFA0307400); 中央高校基本科研基金(ZYGX2018J048); 四川省科技计划项目(2020YFG0038)

作者简介: 黄帆(1996-), 男, 硕士研究生, 主要从事液晶光学相控阵器件和应用的研究。E-mail: phihuangfan@163.com

通信作者: 汪相如(1983-), 男, 博士, 教授, 主要从事液晶光电子器件和应用的研究。E-mail: xiangruwang@uestc.edu.cn

版权所有©2021 中国科学院光电技术研究所

33 °C, the corresponding maximum phase aberration is 3.6 rad. At the same time, based on the measured phase modulation results, this paper studies the deterioration process of the beam quality of the outgoing light. Analysis results show that the deterioration of beam quality is less than 20% when the core temperature of the liquid crystal phase shifter changes less than 10 °C.

**Keywords:** liquid crystal optical phased array; high power laser; phase deterioration; beam quality

## 1 引言

作为光学相控阵技术之一, 液晶光学相控阵技术已经被证实是一种能够实现非机械式光束偏转的方法, 它采用驱动电压低、相位调制深度大的列相液晶作为相位调制的电光材料, 对光束的偏转具有非机械、扫描精度高、电控、响应快、阈值电压低、体积小等优点, 将其应用于空间光调制将会有较大的优势<sup>[1-2]</sup>。随着液晶相控阵技术的成熟, 对相关性能的研究(比如: 衍射效率、扫描精度、波束控制等)越来越广泛和深入<sup>[3-5]</sup>。但是在高功率激光注入液晶相控阵的应用场景下, 对相控阵的性能变化等方面研究比较少。因此, 研究高功率激光注入下的液晶相控阵性能变化是必要的。

常见的液晶相控阵器件是多层对称式固液混合结构, 包括上下基片、透明导电电极层、液晶取向层和液晶分子层。当液晶器件对高功率激光进行相位调制时, 器件各种材料对激光的吸收以及入射激光束的不均匀性, 会导致热沉积作用的积累<sup>[6]</sup>。当激光功率到达几百瓦时, 未经特殊设计的液晶器件的内部温度会显著升高<sup>[7]</sup>。然而, 液晶是一种对温度比较敏感的材料, 温度的大幅变化会恶化它的工作性能。同时, 由于液晶的非线性系数较大, 还会增大液晶的非线性响应, 影响液晶器件的光学性能<sup>[8-10]</sup>。

针对液晶相控阵耐受阈值的研究, 国内外已有许多报导。美国 Raytheon 公司曾经发布了其研究成果: 耐受指标可达 113 W/cm<sup>2</sup>, 美国空军实验室表示成功制备出耐受阈值为 100 W/cm<sup>2</sup> 的器件<sup>[11]</sup>。针对液晶调制器在高功率应用中的损伤以及性能退化的现象, 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所测量了高功率激光入射场景下, 液晶调制器在 808 nm 波长下的耐久性。结果表明, 液晶调制器能承受 133 W/cm<sup>2</sup> 的激光, 一旦激光功率密度超过阈值, 在偏光显微镜下就会观察到液晶分子的相变<sup>[12]</sup>。中国科学院上海光学精密机械研究所对此进行了更详细的总结, 这对相关器件制作工艺的优化起到指导性意见<sup>[13]</sup>。另外, 针对反射式或透射式液晶光学相控阵的阈值提升问题, 相应

的热力学模型已经被构建并用来分析热沉积形成的主要原因, 同时从理论上探讨温度梯度引起的液晶调制相位畸变<sup>[14-15]</sup>。

然而, 在得到畸变相位前, 需要知道液晶材料参数  $A$ 、 $B$ 、 $\beta$ 、液晶层厚度  $L$ 、液晶的清亮点温度  $T_c$ 、液晶在 0 K 时的各向异性介电常数  $(\Delta\epsilon)_0$ 、弹性常数  $(K_{ii})_0$  和各向异性折射率  $\Delta n_0$ 。之后才能依据理论去计算温度影响下的实际相位, 但材料参数的不确定性会极大影响计算结果的准确性, 本文的测试方法能避免这个误差。

在高功率激光入射液晶光学相控阵场景下, 本文提出一种基于四分之一波片法的改进光路, 在不知道准确的液晶材料参数下, 测试得到液晶移相器在某一温度和电压条件下的实际调制相位。并基于该实际调制相位和光束传播理论, 探讨液晶光学相控阵出射光的远场特性和光束质量恶化过程。

## 2 理论

### 2.1 热畸变相位的获取

#### 2.1.1 热致相位实验测试

为准确得到液晶相控阵的实际调制相位(称作“热致相位”), 并且不受液晶材料的限制, 设计如图 1 所示的基于四分之一波片的光路来采集不同温度下液晶单元移相器的电压-相位数据。

液晶相控阵起偏器的光轴与图 1 所示的  $x$  坐标轴重合, 激光器 1 的出射光  $E_m$  可表示为(假设幅值为 1):

$$E_m = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

为了便于后面的计算, 先计算在上述坐标系下任意波片的琼斯矩阵。假如波片的  $e$  光轴与  $x$  轴的夹角为  $\theta$ , 波片快慢轴之间的相位差为  $\alpha$ , 在上述坐标系下, 波片的琼斯矩阵表达式为

$$Q = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} e^{i\alpha} & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \quad (2)$$

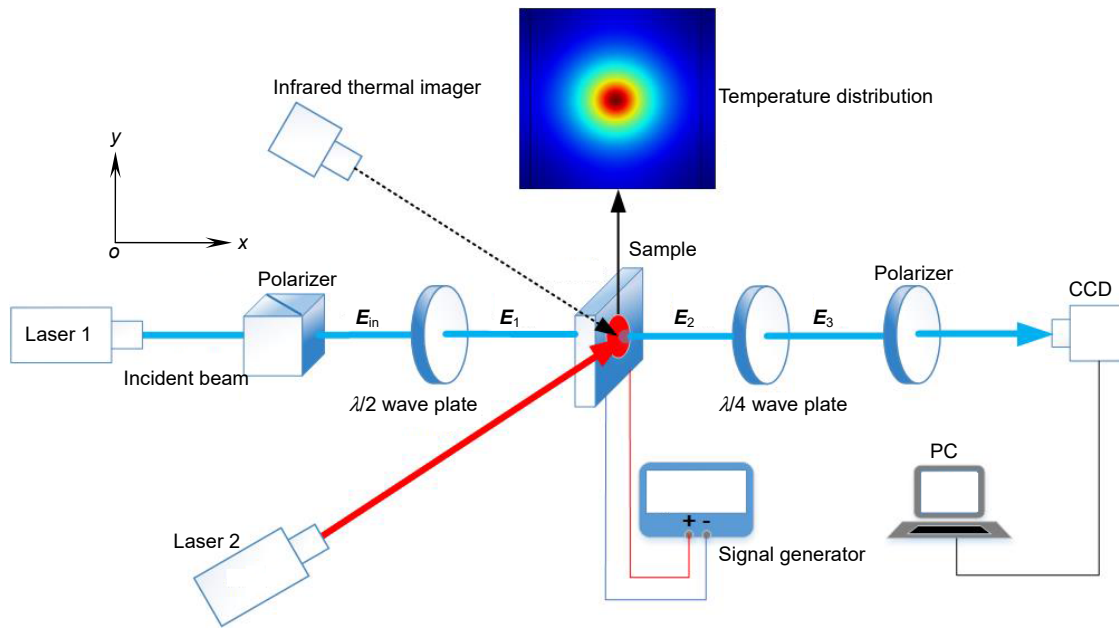


图 1 光路结构  
Fig. 1 Optical path structure

设二分之一波片、液晶单元移相器以及四分之一波片的琼斯矩阵表达形式为  $Q_1$ 、 $Q_2$ 、 $Q_3$ 。

在图 1 所述光路中，二分之一波片光轴的角度呈  $22.5^\circ$  ( $\theta=22.5^\circ$ ,  $\alpha=\pi$ )。因此， $E_{in}$  经过二分之一波片后，透射光  $E_1$  的琼斯矩阵为

$$\begin{aligned}
 E_1 &= Q_1 \cdot E_{in} \\
 &= \begin{bmatrix} \cos 22.5^\circ & -\sin 22.5^\circ \\ \sin 22.5^\circ & \cos 22.5^\circ \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 &\quad \cdot \begin{bmatrix} \cos 22.5^\circ & \sin 22.5^\circ \\ -\sin 22.5^\circ & \cos 22.5^\circ \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \\
 &= -\frac{\sqrt{2}}{2} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix}
 \end{aligned} \tag{3}$$

液晶单元移相器的取向方向沿  $x$  轴方向 ( $\theta=0^\circ$ ,  $\alpha=\phi$ )， $\phi$  为液晶单元移相器的调制相位。于是  $E_1$  经过液晶单元移相器后，透射光  $E_2$  的琼斯矩阵为

$$\begin{aligned}
 E_2 &= Q_2 \cdot E_1 \\
 &= -\frac{\sqrt{2}}{2} \begin{bmatrix} e^{i\phi} & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} \\
 &= -\frac{\sqrt{2}}{2} \begin{bmatrix} e^{i\phi} \\ 1 \end{bmatrix}
 \end{aligned} \tag{4}$$

四分之一波片的光轴方向与  $x$  轴呈  $45^\circ$  夹角 ( $\theta=45^\circ$ ,  $\alpha=\pi/2$ )。因此透射光  $E_3$  矩阵变化为

$$\begin{aligned}
 E_3 &= Q_3 \cdot E_2 \\
 &= -\frac{\sqrt{2}}{2} \begin{bmatrix} \cos 45^\circ & -\sin 45^\circ \\ \sin 45^\circ & \cos 45^\circ \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 &\quad \cdot \begin{bmatrix} \cos 45^\circ & \sin 45^\circ \\ -\sin 45^\circ & \cos 45^\circ \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} e^{i\phi} \\ 1 \end{bmatrix} \\
 &= -ie^{\frac{\phi}{2}} \begin{bmatrix} \cos\left(\frac{\phi}{2} - \frac{\pi}{4}\right) \\ -\sin\left(\frac{\phi}{2} - \frac{\pi}{4}\right) \end{bmatrix}
 \end{aligned} \tag{5}$$

式(5)说明  $E_3$  是一个具有一定夹角的线偏振光，且夹角与液晶移相器调制的相位  $\phi$  呈线性相关，检偏器消光时的角度信息可以表示此时的偏振状态信息。调制相位  $\phi$  只受到两种因素的影响：外加电压和温度。如图 1 所示，通过信号发生器可以改变加载在液晶单元移相器上的电压，而通过调整可调谐激光器 2 的功率可以改变器件中心的温度。

规定液晶移相器调制相位是 0 时，检偏器光轴的角度为  $\beta_0$ 。同时，设定某一电压  $U$  和温度  $T$  时器件调制的相位为  $\phi$ ，此时对应检偏器消光的角度为  $\beta_1$ 。

由式(5)可得：

$$\phi = 2(\beta_1 - \beta_0) \tag{6}$$

根据式(6)，同时通过调节信号发生器和可调谐激光器 2 改变实验条件，能得到不同温度下的电压-相位

曲线,如图 2 所示。从图 2 数据曲线中挑选几组固定电压的相位数据,然后进行插值处理,得到不同电压下的温度-相位曲线,如图 3 所示。

结合图 2 和图 3,可以得到任意温度下的电压-相位关系,并存为一张数据表。此后,每给定一个固定的温度空间分布和电压空间分布,通过查表就可得知液晶光学相控阵的实际调制相位分布。

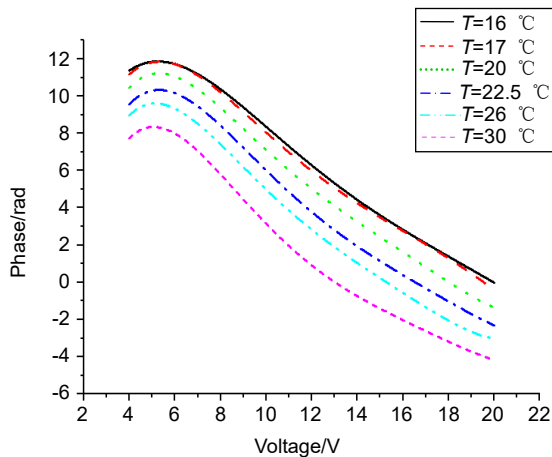


图 2 几种温度下的  $U-\phi$  数据  
Fig. 2 Voltage-phase data at several temperatures

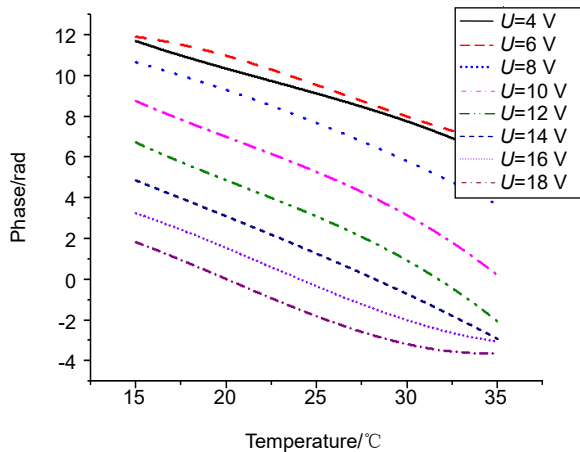


图 3 几种电压下的  $T-\phi$  数据  
Fig. 3 Temperature-phase data at several voltages

### 2.1.2 热致相位实验测试

利用上一小节得到的液晶调制相位与电压和温度的特性,可以得到在某一温度分布下液晶相控阵在偏转某个角度时的实际相位分布。下面以液晶相控阵偏

转  $\theta=0.5$  mrad 为例,分析各种温度下相位分布的畸变程度。

根据理论偏转角  $\theta=0.5$  mrad 以及室温(26 °C)下的电压-相位特性曲线给每个控制电极加载对应的电压,保证相控阵近场调制的相位分布为完美的锯齿分布(如图 4(b)所示)。本文所用液晶的清亮点在 60 °C 左右,因此为保证液晶器件能正常工作,温度必须低于 60 °C,同时为详细分析器件性能在高功率下的退化情况,下面将探讨 4 种温度情况下器件的相位变化情况。由于入射光一般是高斯光,因此假设器件中心附加 4 种中心温度( $\leq 60$  °C)(42 °C、39 °C、37 °C、33 °C)不同的一维高斯温度分布(如图 4(a)所示),再根据之前建立的温度-电压-相位关系,各种温度分布对应下的实际调制相位分布如图 4(c)所示,与理想锯齿相位做差值得到的相位畸变量如图 4(d)所示。

图 4(c)揭示了在相同电压情况下,温度梯度给器件调制相位分布带来的恶化现象:温度影响下的实际相位分布有一个与外部温度分布有关的高斯包络。同时升温越大,实际调制相位偏离理想相位的程度(畸变相位)越大。通过图 4(d)可以得到当中心温度为 33 °C、37 °C、39 °C、42 °C 时,对应的最大畸变相位(rad)分别为 3.6、6.57、8.43、11.65。继续观察图 4(d),可以发现,每种温度情况下的畸变相位都有一个高斯型包络,该包络与对应情况下的温度分布相似。同时,高斯包络带有许多的锯齿峰,这个是因为器件理想的相位调制就是周期性的锯齿分布(见图 4(b))。

### 2.2 光束质量随传输距离的变化

在获得液晶相控阵在某一温度分布下的实际调制相位分布后,为分析温度对液晶相控阵工作性能的影响,探究相位畸变与光束质量恶化之间的关系,采用有限差分光束传播法<sup>[16]</sup>求解出光场分布。

从波动方程出发点进行计算,假设传播环境是无源自由二维空间,没有自由电荷和传导电流。实验研究的对象是单色波,具有时谐电磁场的特性,场强传播特性满足亥姆霍兹方程:

$$\nabla^2 E + k^2 E = 0, \tag{7}$$

式中:  $\nabla$  为哈密顿算子,  $k$  为波数。光波的复振幅可以表示为

$$E = E(x, z) \exp(-ikz), \tag{8}$$

式中:  $z$  为光束的传播方向,  $x$  是横向。

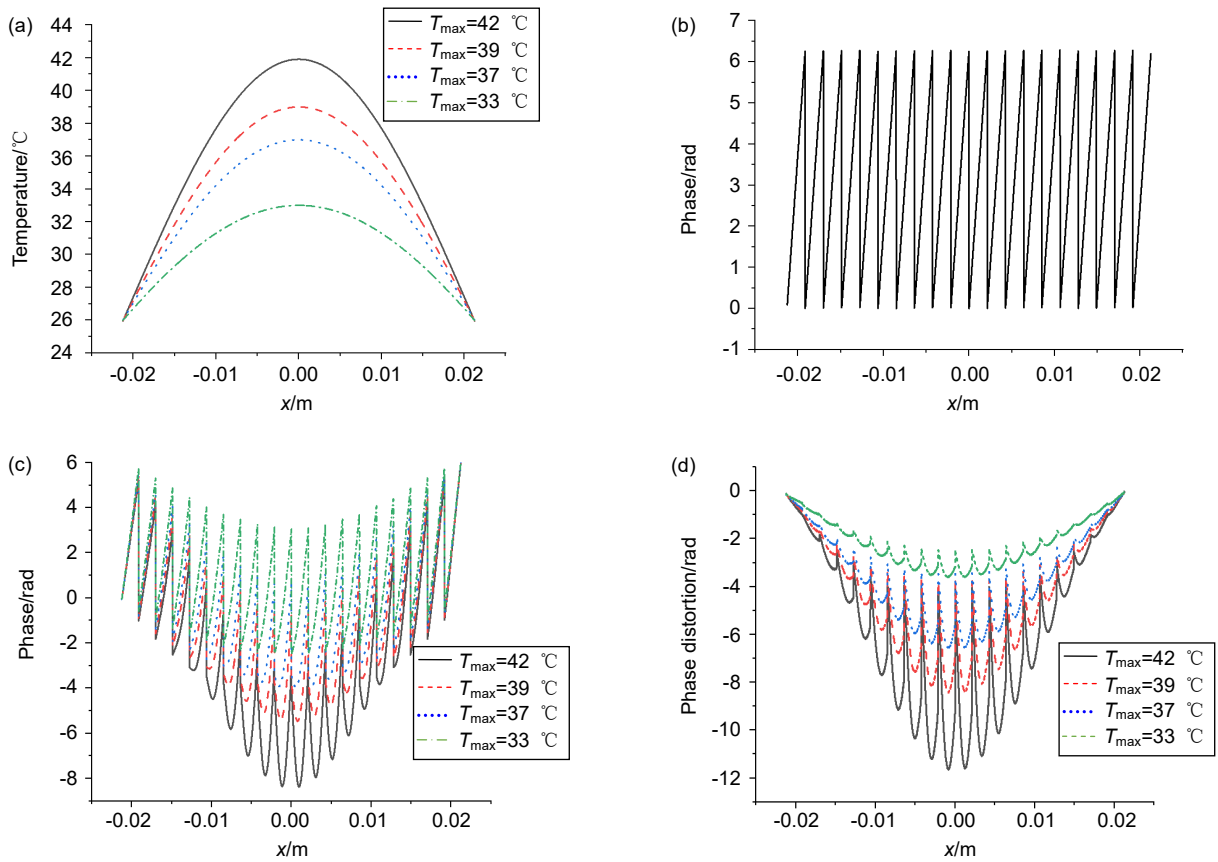


图 4 (a) 高斯温度分布; (b) 理想相位分布; (c) 实际调制相位分布; (d) 相位畸变量

Fig. 4 (a) Gaussian temperature distributions; (b) Ideal phase distribution; (c) Actual modulation phase distributions; (d) Phase distortion

把式(8)带入式(7), 可得:

$$\nabla^2 E = e^{-ikz} \left( \frac{\partial^2 E(x,z)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E(x,z)}{\partial z^2} - 2ik \frac{\partial E(x,z)}{\partial z} - k^2 E(x,z) \right) \quad (9)$$

再将式(9)代入式(7), 并且进行缓变振幅近似, 可得二维光场传输方程:

$$\frac{\partial^2 E(x,z)}{\partial x^2} - 2ik \frac{\partial E(x,z)}{\partial z} = 0 \quad (10)$$

这是一个抛物型偏微分方程, 采用 DuFort-Frankel 格式对其进行有限差分求解, 该格式的优点是显式且绝对稳定<sup>[17]</sup>。如图 5 所示把求解区域均匀划分为网格。

并令:

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 E}{\partial x^2}(x_i, z_j) = \frac{E_{i+1,j} - (E_{i,j+1} + E_{i,j-1}) + E_{i-1,j}}{(\Delta x)^2} \\ \frac{\partial E}{\partial z}(x_i, z_j) = \frac{E_{i,j+1} - E_{i,j-1}}{2\Delta z} \end{cases} \quad (11)$$

式中:

$$\Delta x = \frac{2a}{m}, \quad \Delta z = \frac{2b}{n}$$

2a、2b 分别为求解区域在 x、z 方向上的长度。

将式(11)代入式(10), 可得节点 (iΔx, jΔz) 处的自由光场复振幅满足:

$$E_{i,j+1} = \frac{r-1}{r+1} E_{i,j-1} + \frac{1}{r+1} (E_{i+1,j} + E_{i-1,j}) \quad (12)$$

其中  $r = \frac{ik * (\Delta x)^2}{\Delta z}$ 。

式(12)为一种三层差分格式, 由第 0 层和第 1 层的光场分布可依次推出第 2 层、第 3 层光场分布, 第 0 层为已知的初始光场分布, 而第 1 层各节点处光场可通过下式获得:

$$E_{i,j+1} = \frac{1}{2r} (E_{i+1,j} - 2E_{i,j} + E_{i-1,j}) + E_{i,j} \quad (13)$$

结合式(12)、式(13)进行求解, 可得光束在某一处场强分布。注意, 式(8)中的 E(x,z) 包含初始相位因子(即液晶器件的实际调制相位), 如果调制相位有变化, 对应求解出来的场强便会发生变化。



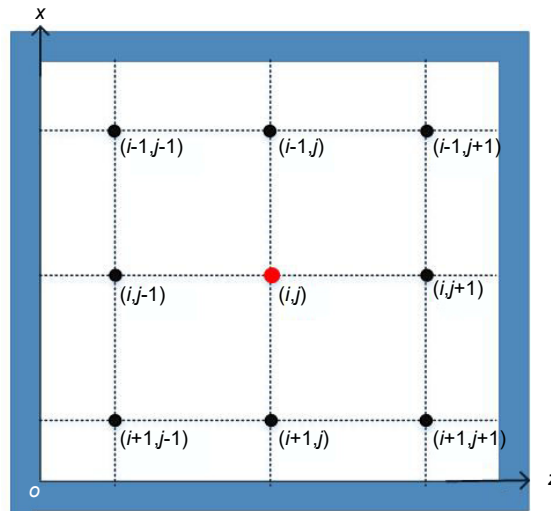


图 5 有限差分法网格划分  
Fig. 5 Finite difference method meshing

初始面的光强振幅分布和相位分布给定后，每一处的光强分布都可以随之确定。在光束质量评价指标中，比较适合高功率应用场景的评价指标是桶中功率 PIB 或者桶中功率比(BQ, 在公式中用  $R_{BQ}$  表达)<sup>[18]</sup>。本文采用桶中功率比 BQ 来判定每一处的光束质量。

以初始相位面为理想锯齿相位(如图 4(b)所示)的高斯光作为参考光，以参考光的质心为桶中心，以 3 倍参考光的光斑半径为桶半径，这个桶范围内实际光斑包含的能量与相同桶空间内参考光斑包含的能量比值的方根就是光束质量，相应表达式为

$$R_{BQ} = \sqrt{\frac{\int_{c-3\omega_0}^{c+3\omega_0} E_{ideal}^2 dx}{\int_{c-3\omega_0}^{c+3\omega_0} E_{real}^2 dx}}, \quad (14)$$

式中： $c$  为参考光的质心位置， $\omega_0$  为参考光的光斑半径。易得，BQ 为 1 时，光束质量越好，且 BQ 越大，光束质量越差。

假定初始面的高斯光振幅分布为

$$E(x) = \exp\left(-\frac{x^2}{w^2}\right), \quad (15)$$

式中： $w$  为光束的光腰半径，并设置  $w=0.015$  m。

将热致相位作为因子传入式(8)进行计算，利用 Matlab 进行仿真，设定工作波长为  $1.064 \mu\text{m}$ ， $z$  向传输步进设置为  $0.01$  m，横向  $x$  轴步进为  $1 \times 10^{-4}$  m，可得到传输距离 1000 m 内光束质量的变化，如图 6 所示。

从图 6 中可以看出，随着传输距离的增大，出射

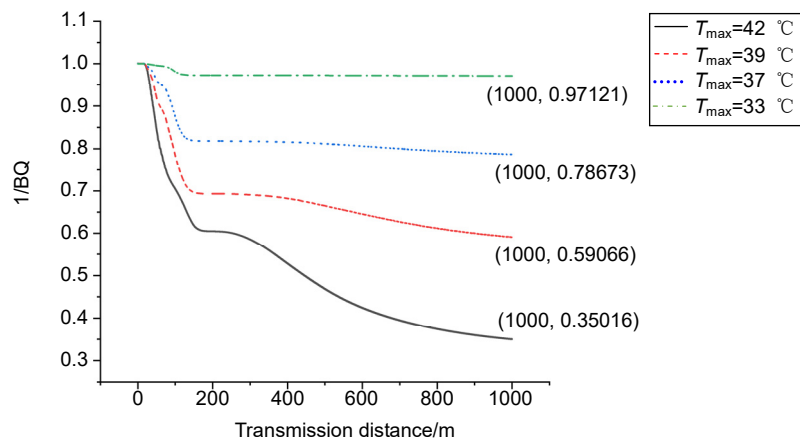


图 6 几种温度分布下 1/BQ 随传输距离的变化  
Fig. 6 Variation of beam quality with transmission distance under several temperature distributions

光的光束质量会慢慢减小并逐渐趋于稳定。与室温 26 °C 比较, 最大温升为 16 °C 时, 光束质量在 1000 m 处大约恶化 65% 左右, 最大温升为 7 °C 时, 恶化却只有 3%。当中心温度变化小于 10 °C 时, 液晶相控阵的工作性能恶化小于 20%。

### 3 结 论

在高功率激光入射液晶光学相控阵条件下, 本文提出一种基于四分之一波片法的光路, 在不知道准确的液晶材料参数下, 直接测试得到液晶移相器在某一温度和电压条件下的实际调制相位。实验表明, 温度梯度分布引起的相位畸变呈现两大特点, 具有和温度分布有关的高斯包络以及拥有和给定理想相位分布一样的锯齿周期。当中心温度为 33 °C 时, 对应的最大畸变相位为 3.6 rad。并基于该实际调制相位和光束传播理论, 探讨液晶光学相控阵出射光的远场特性和光束质量恶化过程。温度越高, 液晶相控阵出射光的光束质量越差。中心温度变化小于 10 °C 时, 液晶相控阵的工作性能恶化小于 20%。

### 致 谢

本文工作由国家自然科学基金资助项目(61775026, 61871031)、国家重点研发计划(2018YFA0307400)、中央高校基本科研基金(ZYGX2018J048)、四川省科技计划(2020YFG0038)资助, 在此表示感谢。同时感谢国防科技大学的马阎星与周朴两位老师的帮助。

### 参考文献

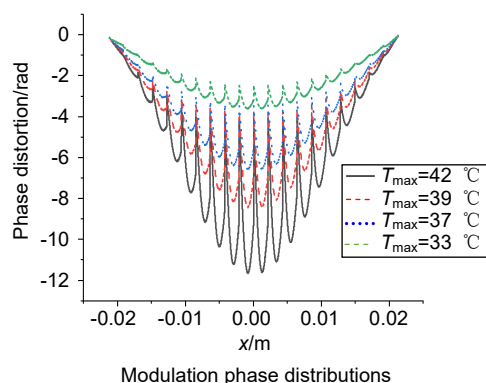
- [1] Zhang J, Xu L, Wu L Y, *et al.* Programmable beam steering based on liquid crystal optical phased array[J]. *Acta Photon Sin*, 2008, **37**(8): 1497–1502.  
张健, 徐林, 吴丽莹, 等. 液晶光学相控阵可编程光束偏转研究[J]. *光子学报*, 2008, **37**(8): 1497–1502.
- [2] McManamon P. An overview of optical phased array technology and status[J]. *Proc SPIE*, 2005, **5947**: 594701.
- [3] Zhao X J, Liu C L, Zhang D Y, *et al.* Optimized analysis of diffraction efficiency for liquid crystal optical phased array[J]. *Acta Opt Sin*, 2013, **33**(11): 1123002.  
赵祥杰, 刘仓理, 张大勇, 等. 液晶相控阵衍射效率的优化分析[J]. *光学学报*, 2013, **33**(11): 1123002.
- [4] Kong L J, Yi W, Yang J Y, *et al.* Research on scanning accuracy of liquid crystal phased array component of laser radar[J]. *Chin J Lasers*, 2009, **36**(5): 1080–1085.  
孔令讲, 易伟, 杨建宇, 等. 激光雷达液晶相控阵组件扫描精度分析[J]. *中国激光*, 2009, **36**(5): 1080–1085.
- [5] 宋艳. 液晶相控阵波束控制模型与算法研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2010: 16–34.
- [6] Gu D, Wen B, Mahajan M, *et al.* High power liquid crystal spatial light modulators[J]. *Proc SPIE*, 2006, **6306**: 630602.
- [7] Xi T, Di J L, Dou J Z, *et al.* Measurement of thermal effect in high-power laser irradiated liquid crystal device using digital holographic interferometry[J]. *Appl Phys B*, 2019, **125**(6): 103.
- [8] Zhao X J, Luo Y Q, Wang H F, *et al.* Propagation of high power laser beam in nematic liquid crystal and its diffraction ring effect[J]. *Chin J Liq Cryst Disp*, 2010, **25**(5): 661–665.  
赵祥杰, 骆永全, 王海峰, 等. 强激光诱导液晶衍射环现象的实验与数值研究[J]. *液晶与显示*, 2010, **25**(5): 661–665.
- [9] Santamato E, Abbate G, Maddalena P, *et al.* Laser-induced nonlinear dynamics in a nematic liquid-crystal film[J]. *Phys Rev Lett*, 1990, **64**(12): 1377–1380.
- [10] Lukishova S G. Liquid crystals under high-power, nanosecond laser irradiation[J]. *Proc SPIE*, 2013, **8642**: 86420A.
- [11] Dorschner T A. Adaptive Photonic phase locked elements: an overview (Briefing charts)[R]. Raytheon Co El Segundo Ca Network Centric Systems, 2007.
- [12] 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]. *J Opt A: Pure Appl Opt*, 2007, **9**(4): 427–430.
- [13] Liu X F, Zhao Y A, Peng L P, *et al.* Application problems of liquid crystal phase modulators to high power lasers[J]. *High Power Laser Part Beams*, 2020, **32**(3): 032003.  
刘晓凤, 赵元安, 彭丽萍, 等. 液晶相位调控器件的高功率激光应用相关问题[J]. *强激光与粒子束*, 2020, **32**(3): 032003.
- [14] 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]. *Opt Commun*, 2017, **382**: 437–443.
- [15] 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]. *Appl Phys B*, 2018, **124**(3): 35.
- [16] Chung Y, Dagli N. An assessment of finite difference beam propagation method[J]. *IEEE J Quantum Elect*, 1990, **26**(8): 1335–1339.
- [17] Zhang X, Liu W G. Mode calculation method for active unstable resonator based on Helmholtz Equation[J]. *Elect - Opt Tech Appl*, 2011, **26**(3): 1–3, 9.  
张骁, 刘文广. 基于亥姆霍兹方程的有源非稳腔模式计算方法[J]. *光电技术应用*, 2011, **26**(3): 1–3, 9.
- [18] Feng G Y, Zhou S H. Discussion of comprehensive evaluation on laser beam quality[J]. *Chinese J Lasers*, 2009, **36**(7): 1643–1653.  
冯国英, 周寿桓. 激光光束质量综合评价的探讨[J]. *中国激光*, 2009, **36**(7): 1643–1653.

# Analysis of temperature-induced liquid crystal phase control beam quality deterioration

Huang Fan<sup>1</sup>, Wang Xiangru<sup>1\*</sup>, He Xiaoxian<sup>1</sup>, Zhang Mengxue<sup>1</sup>,  
Wang Yingli<sup>1</sup>, Guo Hongyang<sup>2</sup>, Hu Jie<sup>2</sup>, Ma Haotong<sup>2</sup>

<sup>1</sup>School of Optoelectronic Science and Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 611731, China;

<sup>2</sup>Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China



**Overview:** The liquid crystal optical phased array (LCOPA) is the core device of next-generation beam control technology. For beam deflection control, it has the advantages of high precision, fast response, low threshold voltage, small size, etc. Increasing its laser-induced damage threshold is one of the current research hot spots. Temperature distribution will be formed on the surface of the device, due to the absorption of the device when a high-power laser is illuminated. Since the liquid crystal is a temperature-sensitive optoelectronic material, its phase modulation to incident light will deteriorate due to temperature rise. To investigate the performance of LCOPA under high-power laser incidence, the relationship between temperature and phase modulation must be established. Aiming at the scene of high-power laser incidence, the degradation degree of LCOPA phase modulation performance should be evaluated. The traditional method is to calculate directly through theory, but the accurate liquid crystal characteristic parameters must be known first, and for unknown liquid crystals, this method is difficult. Based on the traditional quarter-wave plate method, this paper realizes fast and direct measurement of the phase modulation distribution of high-power incident light with a LCOPA, and then the temperature-voltage-phase correspondence of the liquid crystal is established.

The LCOPA is loaded with a specific periodic voltage value to make the ideal deflection angle of 0.5 mrad. At the same time, 4 kinds of one-dimensional Gaussian temperature distributions with different core temperatures (42 °C, 39 °C, 37 °C, 33 °C) are added to the device. The actual phase distribution of LCOPA can be obtained according to the above temperature-voltage-phase correspondence relationship. The result show that the phase distortion distribution under the influence of temperature has a Gaussian envelope related to the external temperature distribution, and there is also a sawtooth distribution related to the external voltage distribution on the Gaussian envelope. Meanwhile, the phase distortion reaches the maximum at the core temperature. Taking the center temperature of 33 °C as an example, the corresponding maximum distortion phase amount is 3.6 rad. Then, based on the phase modulation results at the above four temperatures, starting from the Helmholtz equation and taking the efficiency ratio in the barrel as the criterion, the quality deterioration process of the beam within 1000 m from the device is studied. The MATLAB simulation results show that as the transmission distance increases, the beam quality of the emitted light slowly decreases and finally stabilizes. The deterioration of beam quality is less than 20% when the core temperature of the liquid crystal phase shifter changes less than 10 °C.

Huang F, Wang X R, He X X, *et al.* Analysis of temperature-induced liquid crystal phase control beam quality deterioration[J]. *Opto-Electron Eng*, 2021, 48(6): 200463; DOI: 10.12086/oe.2021.200463

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (61775026,61871031), National Key R&D Program of China (2018YFA0307400), Central University Basic Research Fund (ZYGX2018J048), and Sichuan Province Science and Technology Plan (2020YFG0038)

\* E-mail: [xiangruwang@uestc.edu.cn](mailto:xiangruwang@uestc.edu.cn)