

液晶光学相控阵的高功率波束指向特性研究*

张梦雪, 王 浩, 汪相如[✉]

(电子科技大学光电科学与工程学院 成都 611731)

摘要: 针对液晶光学相控阵 LCOPA (Liquid Crystal Optical Phased Array) 在高功率激光入射场景下的波束指向特性, 构建了 LCOPA 的热力学模型, 利用 Ericksen Leslie 动力学理论和液晶材料的温度特性, 对不同入射激光功率和不同液晶材料条件下 LCOPA 的近场相位分布、远场偏转效率和偏转响应过程进行数值仿真分析。结果表明, 当入射激光功率从 50 W 增加到 110 W 时, 近场相位分布趋于恶化, 远场偏转效率从 96.8% 下降到 41.3%; 5PCH、UCF-35、MLC-624-000 三种液晶材料的温度敏感性逐渐减弱, 远场偏转效率分别为 41.3%、92.3%、98.8%; 同时, 入射激光功率的增加会缩短相控阵器件的下降时间, 而对其上升时间和切换时间无明显影响。

关键词: LCOPA; 高功率激光; 相位恶化; 响应时间

中图分类号: O436.4 **文献标识码:** A **文章编号:** CN11-1780(2022)04-0015-10

DOI: 10.12347/j.ycyk.20220119002

引用格式: 张梦雪, 王浩, 汪相如, 等. 液晶光学相控阵的高功率波束指向特性研究[J]. 遥测遥控, 2022, 43(4): 15-24.

Research of liquid crystal optical phased array beam steering characteristics with high power laser incidence

ZHANG Mengxue, WANG Hao, WANG Xiangru

(School of Optoelectronic Science and Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China)

Abstract: Focusing on LCOPA (Liquid Crystal Optical Phased Array) beam steering characteristics with high power laser incidence, the thermodynamic model of liquid crystal optical phased array is established in this paper. According to Ericksen Leslie theory and temperature characteristics of liquid crystal materials, the phase distribution in near field, deflection efficiency in far field and response process of LCOPA are analyzed by numerical method under the condition of different incident and different liquid crystal materials. As a result, when the incident laser power increases from 50 W to 110 W, the phase distribution in near field tends to deteriorate and the deflection efficiency in far field decreases from 96.8% to 41.3%. Among three liquid crystal materials, 5PCH, UCF-35, MLC-624-000, the deflection efficiency in far field is 41.3%, 92.3% and 98.8%, respectively, with their temperature sensitivity gradually decreasing. Meanwhile, when incident laser power rises, the drop time of LCOPA is shortened and the rise time and switch time are not significantly affected.

Key words: LCOPA; High power laser; Phase deterioration; Response time

DOI: 10.12347/j.ycyk.20220119002

Citation: ZHANG Mengxue, WANG Hao, WANG Xiangru, et al. Research of liquid crystal optical phased array beam steering characteristics with high power laser incidence[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2022, 43(4): 15-24.

引 言

伴随着航天、能源、通信等高新技术产业的飞速发展, 激光技术已经表现出明显的优势。在激光技术的众多应用中, 波束指向控制具有广阔的应用场景。波束指向控制技术可分为两种: 机械式和非机械

*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)

[✉]通信作者: 汪相如 (xiangruwang@uestc.edu.cn)

收稿日期: 2022-01-19

式^[1]。LCOPA 是实现非机械式光束指向控制的方案之一, 与传统的机械式光束指向技术相比, 具有体积小、功耗低、精度高、惯性小、扫描快等优势^[2-4]。在要求快速作战、高精度指向等高效作战特点的高功率激光指向系统中, LCOPA 技术更能解决该系统存在的机械振动明显、体积功耗大、维护周期短等重大缺陷^[5-7]。

LCOPA 制备以透射式为主, 由上下两层平行放置的玻璃基板、透明导电的氧化铟锡 (ITO) 阵列、取向层和液晶材料组成, 如图 1 所示。液晶具有电控双折射效应, LCOPA 通过在上下基板间加载不同电压, 从而改变不同电极位置上液晶的折射率, 使得出射光的近场相位满足一定分布, 实现对波束的指向控制。在红外波段, ITO 对光的吸收率较高。由于热沉积效应, 在高功率激光的连续作用下器件会有明显升温。而液晶是一种对温度敏感的材料, 随着入射激光功率的提高, 相控阵器件上会呈现一定的温度分布, 导致液晶分子的折射率、粘滞系数等关键材料参数发生变化, 从而影响波束的指向效果。

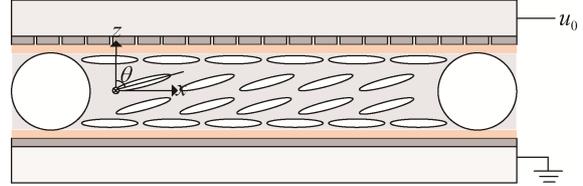


图 1 LCOPA 结构

Fig. 1 Structure of LCOPA

1 理论

1.1 Ericksen Leslie 动力学理论

LCOPA 中使用的液晶材料通常为正性的向列型液晶, 该液晶分子大多为棒状结构, 在外加电场的作用下, 液晶分子会沿着电场方向转动。由于液晶也属于流体, 液晶指向矢的变化会与液晶的流动相互影响, 这种关系可以通过 Erickson-Leslie 方程进行描述^[8,9]。

$$\gamma \frac{\partial \theta}{\partial t} = k \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} + \Delta \varepsilon E^2 \sin \theta \cos \theta \quad (1)$$

式中, γ 为液晶分子的粘滞系数, θ 为液晶指向矢沿盒厚方向的夹角, $\Delta \varepsilon$ 为液晶的介电各向异性常数, E 为器件上下基板间施加的电场。考虑到电场 E 被定义为 $E = -\frac{dV}{dz}$, 此外, 在各向异性的介质中, 电场 E 并不均匀分布, 但是满足 $\Delta(\vec{\varepsilon} \vec{E}) = 0$, 其中相对介电常数 $\vec{\varepsilon}$ 为张量, 所以, 沿液晶盒厚度 z 方向的电势分布 $V(z)$ 可以表达为:

$$\frac{d\varepsilon_{33}}{dz} \frac{dV}{dz} + \varepsilon_{33} \frac{d^2V}{dz^2} = 0 \quad (2)$$

式中, $\varepsilon_{33} = \varepsilon_{\perp} \sin^2 \theta + \varepsilon_{\parallel} \cos^2 \theta$ 。其中, 对于 xyz 直角坐标系, ε_{33} 表示介电常数在 z 方向的分量。 ε_{\perp} 和 ε_{\parallel} 分别是材料的介电常数的垂直和平行分量。式 (2) 可以改写为:

$$(\varepsilon_{\perp} - \varepsilon_{\parallel}) \cdot \sin 2\theta \frac{d\theta}{dz} \cdot \frac{dV}{dz} + (\varepsilon_{\perp} \sin^2 \theta + \varepsilon_{\parallel} \cos^2 \theta) \frac{d^2V}{dz^2} = 0 \quad (3)$$

将电场 E 的定义带入式 (1) 中, 式 (1) 可以改写为:

$$\gamma \frac{\partial \theta}{\partial t} = k \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} + \Delta \varepsilon \left(\frac{dV}{dz} \right)^2 \sin \theta \cos \theta \quad (4)$$

式 (3)、(4) 是一对关于 θ 、 V 的耦合微分方程。在 LCOPA 中, 由于上下基底通过平行取向产生了强锚定的边界条件, 使得 $\theta|_{z=0,l} = 2^\circ$ 。其中, l 表示液晶盒的厚度。同时, 上下基板施加的电压也满足 $V|_{z=0} = 0$, $V|_{z=l} = u_0$ 。

1.2 液晶材料的温度效应

液晶作为 LCOPA 中的关键材料, 波束偏转的效率、响应时间和工作电压均与液晶材料本身的特性

有关。液晶材料的折射率和器件厚度决定了相位调制深度；液晶材料的黏度和器件厚度决定了器件的响应时间；液晶材料的介电常数和弹性常数决定了器件的工作电压。当高功率激光持续入射 LCOPA 时，由于热沉积效应，器件温度会逐渐增加。而液晶是一种对温度敏感的材料，其折射率、黏度、介电常数和弹性常数都会随着温度的变化而变化。当器件温度高于液晶的清亮点时，液晶就会变成各向同性的液体，失去调制相位的能力。

LCOPA 是利用液晶的电控双折射效应来实现入射波束的相位调制。双折射率 Δn 定义为液晶材料的非寻常光折射率 n_e 和寻常光折射率 n_o 的差值，即 $\Delta n = n_e - n_o$ 。液晶材料的平均折射率 $\langle n \rangle$ 则被定义为 $\langle n \rangle = \frac{(n_e + 2n_o)}{3}$ [10]。根据前面的定义，可以将 n_e 、 n_o 表示成以下形式：

$$n_e = \langle n \rangle + \frac{2}{3} \Delta n \quad (5)$$

$$n_o = \langle n \rangle + \frac{1}{3} \Delta n \quad (6)$$

可采用哈勒近似来描述双折射率 Δn 与液晶工作温度 T 的关系：

$$\Delta n(T) = (\Delta n)_0 \left(1 - \frac{T}{T_c}\right)^\beta \quad (7)$$

式中， $(\Delta n)_0$ 是液晶材料在 $T = 0 \text{ K}$ 时的双折射率， β 是材料参数， T_c 是所用液晶材料的清亮点。此外，通过以往的研究发现，液晶的平均折射率随着温度的增加呈现线性减小的趋势，因此可表达为：

$$\langle n \rangle = A - BT \quad (8)$$

将式 (7) 和式 (8)，带入式 (5) 和式 (6) 中，可得到描述液晶 n_e 、 n_o 与工作温度 T 关系的四参数模型：

$$n_e(T) \approx A - BT + \frac{2(\Delta n)_0}{3} \left(1 - \frac{T}{T_c}\right)^\beta \quad (9)$$

$$n_o(T) \approx A - BT - \frac{(\Delta n)_0}{3} \left(1 - \frac{T}{T_c}\right)^\beta \quad (10)$$

式中， A 、 B 为材料参数，可以通过实验测试拟合得到。

此外，影响相控阵器件性能的材料参数还包括粘滞系数 γ 、介电常数 $\Delta \varepsilon$ 和弹性常数 K 。它们与温度的关系可以描述为 [11]：

$$\gamma(T) = b \left(1 - \frac{T}{T_c}\right)^\beta \exp(E / kT) \quad (11)$$

$$\Delta \varepsilon(T) = (\Delta \varepsilon)_0 \left(1 - \frac{T}{T_c}\right)^\beta \quad (12)$$

$$K(T) = (K)_0 \left(1 - \frac{T}{T_c}\right)^{2\beta} \quad (13)$$

式中， b 、 $(\Delta \varepsilon)_0$ 、 $(K)_0$ 都是材料参数， E 是分子液晶转动所需的活化能， k 为玻尔兹曼常数。

2 热致稳态分布

2.1 温度分布特性

当高功率激光入射 LCOPA 时，器件的温度会升高，而液晶是一种温度敏感性材料，温度的增加会影响器件的工作效果。为了分析高功率激光入射下的波束指向特性，首先需要对该场景下的液晶光学相控阵进行热力学仿真分析。可将这个热沉积问题简化为热扩散问题，此过程应符合热扩散基本方程：

$$Q + k \nabla^2 T = 0 \quad (14)$$

式中， Q 为热源的热功率密度， k 为材料的传热系数， T 为器件的温度分布。 Q 由入射激光功率和器件

各组件材料决定, 其具体表达式为:

$$Q(x, y, z) = \frac{2P\alpha}{\pi\omega^2} \cdot f(x, y, z) \quad (15)$$

式中, P 是入射激光的功率, α 是相控阵各组件的吸收系数, 包括基底、导电层、取向层和液晶层, ω 是入射激光的半径, L 是吸收层的厚度。

通过归一化空间分布之后, 入射的高斯光束可表示为:

$$f(x, y, z) = \exp(-2\frac{x^2 + y^2}{\omega^2}) \exp(-\alpha z) \quad (16)$$

将式 (16) 带入式 (15) 后, 便得到热功率密度与入射激光功率的关系:

$$Q(x, y, z) = \frac{2P\alpha}{\pi\omega^2} \cdot \exp(-2\frac{x^2 + y^2}{\omega^2}) \cdot \exp(-\alpha z) \quad (17)$$

在 LCOPA 中, 入射激光主要是被导电膜吸收, 而取向层和液晶层对激光的吸收忽略不计。利用 COMSOL 多物理场仿真软件, 根据图 1 所示的结构建立了器件的几何模型, 将式 (17) 作为热源表达式, 设置相应的边界条件和相关参数之后, 就可得到不同功率激光入射下的器件温度分布, 如图 2 所示。

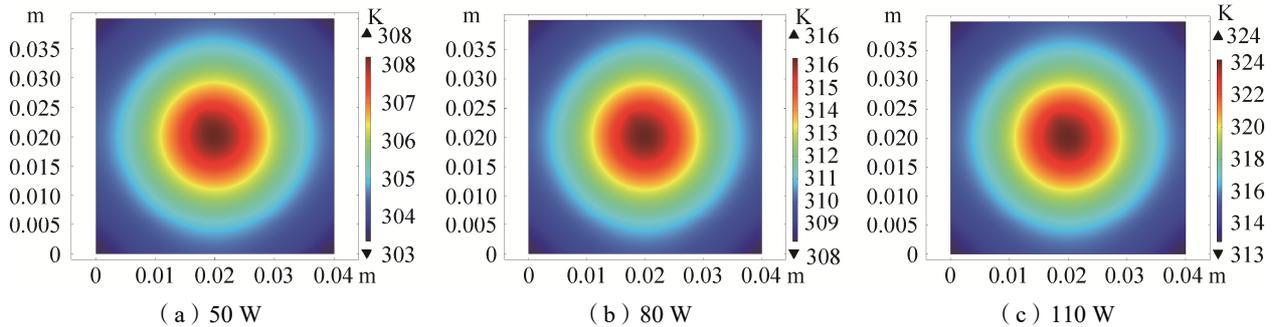


图 2 不同功率下的器件温度分布

Fig. 2 Temperature distribution of LCOPA with different laser powers

从图 2 可以看出, 当入射功率分别为 50 W、80 W 和 110 W 时, 器件的最高温度分布为 308 K、316 K 和 324 K。随着入射激光功率的线性增加, 器件的最高温度基本上也呈线性增加。当功率为 110 W 时, 器件最高温度 (50.6℃) 已经接近部分液晶的清亮点。此外, 由图 3 可以看出, 由于入射光为高斯光束, 所以器件上的温度分布呈类高斯分布。

2.2 相位分布特性

通过上一小节, 已知入射激光功率与 LCOPA 温度分布的数值关系。查阅相关文献[10], 得到了一些常见液晶材料的温度参数, 如表 1 所示。根据器件的温度分布和液晶的温度参数, 便可计算出在给定激光功率和目标偏转角度下的光束相位分布。

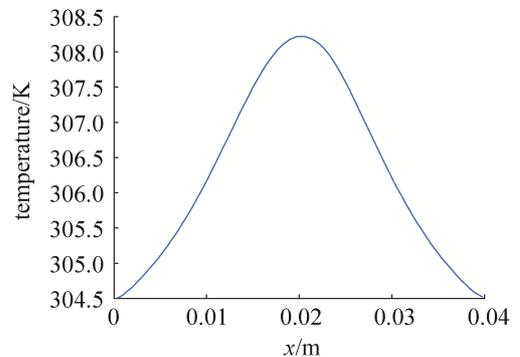


图 3 器件的一维温度分布

Fig. 3 One-dimensional temperature distribution of LCOPA at P=50 W

表 1 不同液晶的材料参数

Table 1 Materia parameters of different LC

液晶	A	B (K ⁻¹)	(Δn) ₀	β	T _c (K)
5PCH	1.679 5	5.07×10 ⁻⁴	0.170 3	0.151 2	326.1
MCL-6241-000	1.623 3	4.00×10 ⁻⁴	0.122 4	0.223 4	373.7
UCF-35	1.818 7	5.32×10 ⁻⁴	0.572 7	0.271 9	368.3

通过 MATLAB 数值仿真, 得到室温 298.25 K 下不同液晶材料的电压-相位关系, 如图 4 所示。通过 LCOPA 后, 以入射波束的目标偏转角度 $\theta_0 = 0.1^\circ$ 、 $\theta_1 = 0.2^\circ$ 为例, 假设第一根电极对应的相位为 0, 则第 i 根电极的相位可以通过下面公式得到:

$$\varphi_i = [(i-1) \cdot k_0 d \sin \theta]_{2\pi} \quad (18)$$

式中, d 为电极周期, $[\]_{2\pi}$ 表示对计算结果进行 2π 取余的操作。

计算出每根电极对应的相位之后, 结合电压-相位曲线, 就能得到每根电极所加载的驱动电压。入射波束通过器件阵列电极的驱动后, 就会呈现如图 5 所示理想的锯齿状相位分布。

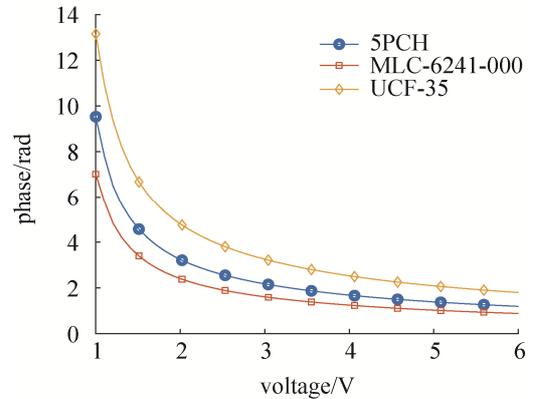


图 4 不同液晶材料的电压-相位关系
Fig. 4 Voltage-phase with different LCs

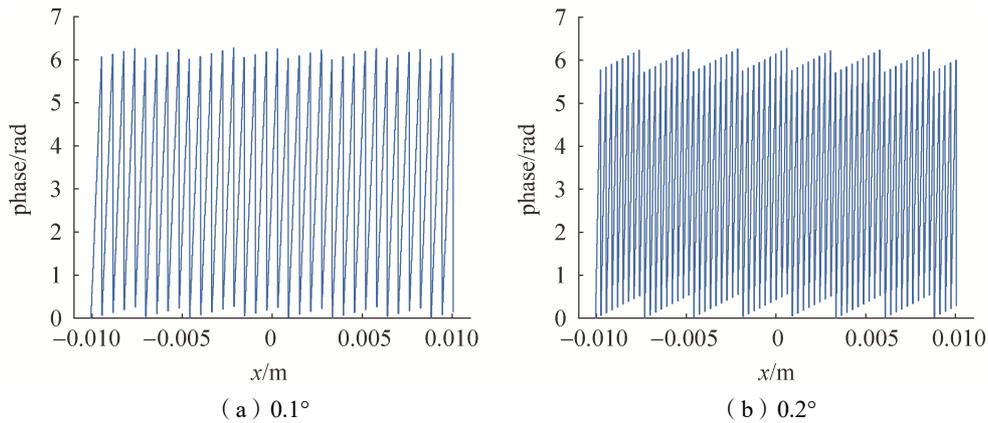


图 5 理想的锯齿状相位分布

Fig. 5 Ideal sawtooth phase distribution

然而, 当入射光为高功率激光时, 由于器件的工作温度发生变化, 前面的电压-相位关系不再一一对应。因此, 在驱动电压不变的情况下, 相控阵的调制能力会发生变化。

为了进一步分析器件在高功率下的变化情况, 下面将结合上文中 COMSOL 的仿真结果, 讨论两种条件下的相控阵近场相位分布: ① 入射激光为 110 W, 不同液晶材料调制相位; ② 使用 5PCH 液晶材料, 入射激光分别为 50 W、80 W 和 110 W。

图 6 (a) 是使用 5PCH 液晶材料的 LCOPA 在 110 W 激光入射下的二维相位分布。因为图 1 所示的相控阵只在一维方向 (x 方向) 对相位进行调制, 所以只需要考虑此维度上的相位恶化情况, 图 6 (b) ~ (d) 为三种不同液晶材料的一维热相位分布。根据式 (7), 随着器件温度的升高, 液晶的双折率 Δn 减小, 因此对入射波束的相位调制能力减弱, 图 6 的仿真结果也验证了这一点。由于器件中心处的温度最高, 因此该处相位出现明显的凹陷, 如图 6 (a) 所示。在 110 W 的功率下, 器件的最高温度为 324 K, 接近 5PCH 液晶的清亮点 326.1 K, 所以在这三种液晶材料中, 5PCH 的相位调制能力恶化最为严重。而 MLC-624-000 和 UCF-35 的清亮点远高于器件温度, 因此相位恶化程度并不剧烈。通过表 1 的材料参数可知, UCF-35 的 A 、 B 、 β 参数均大于 MLC-624-000, 所以 MLC-624-000 对温度更敏感, 相位畸变程度更大。此外, 通过图 6 (b) ~ (d) 可以看出, 热相位分布就是在原本理想相位分布中增加了与温度分布一致的高斯型包络, 其中图 6 (b) 最为明显。

以 5PCH 液晶为例, 图 7 和图 6 (b) 分别展示了 50 W、80 W、110 W 激光入射下的液晶相位调制量。由于 5PCH 的清亮点仅为 326.1 K, 所以当入射功率为 50 W, 器件最高温度为 308 K 时, 器件的相位已出现明显减少, 最大相位调制量已低于 2π ; 80 W 时, 最高温度为 316 K, 相位进一步减少, 并且

出现明显的高斯型包络; 110 W 时, 最高温为 324 K, 十分接近液晶清亮点, 与 80 W 时相比, 相位急剧恶化, 最大相位调制量已不足 1.5π , 此时液晶基本上呈现各向同性状态, 无法正常工作。

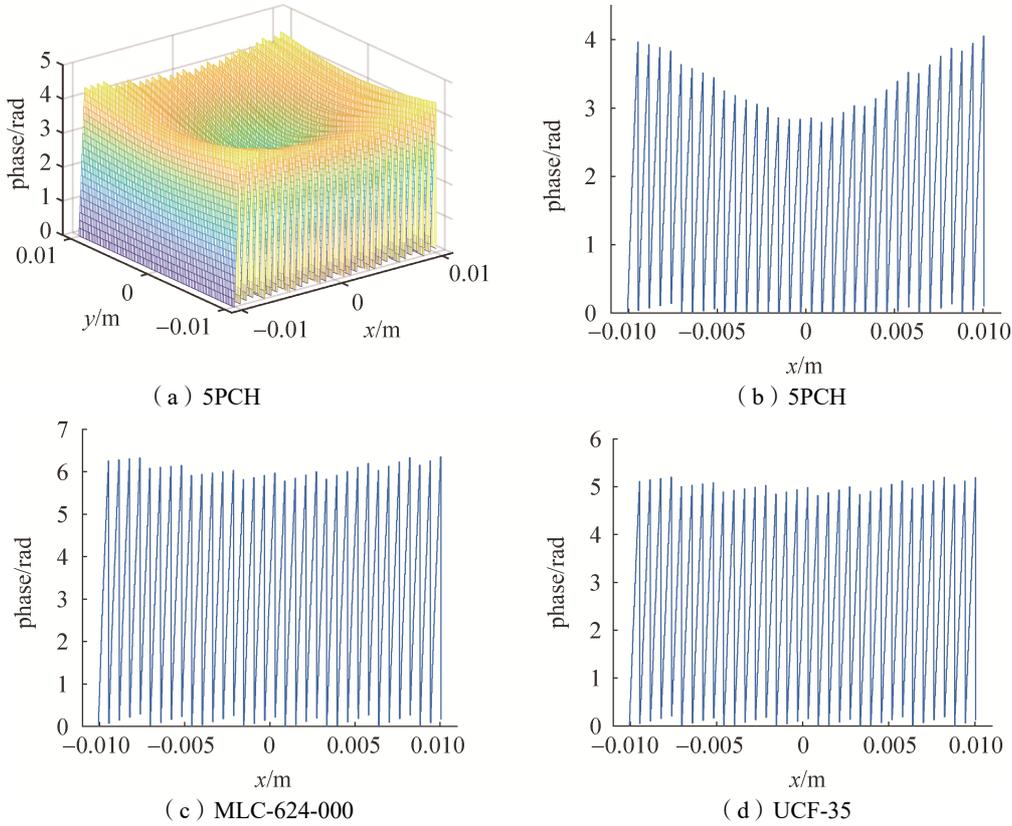


图 6 不同液晶材料的热相位分布
Fig. 6 Thermal phase with different LCs at P=110 W

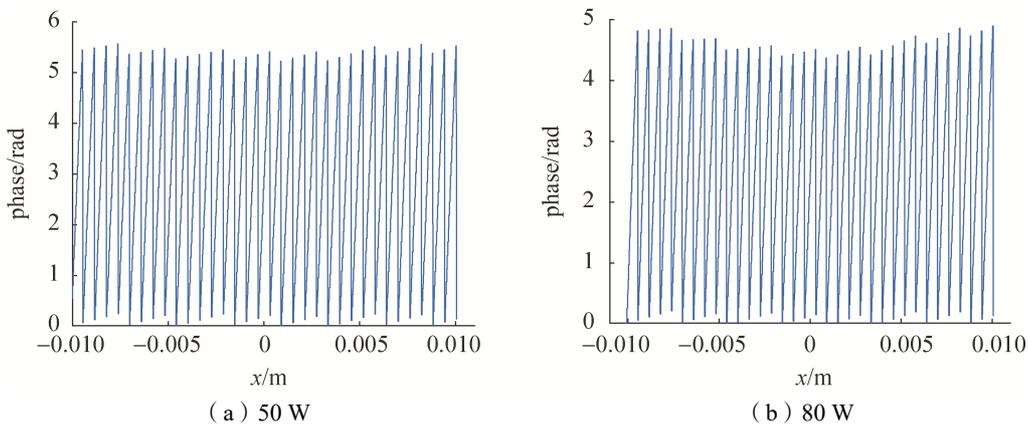


图 7 不同功率的热相位分布
Fig. 7 Thermal phase at different laser powers

2.3 远场特性

基于入射光束通过 LCOPA 的近场相位分布, 通过快速傅里叶变换 (FFT) 就可以得到波束在远场的分布特征, 进而得到偏转角度特性。当波束的近场相位为图 5 所示的理想锯齿状分布时, 远场的光斑能量会全部集中在目标偏转角度, 此时波束的指向效率为 100%, 如图 8 所示。由于不同液晶材料的材料参数有所差异, 使得它们对工作温度的敏感性不同, 所以在高功率激光入射下, LCOPA 的调制相位与理想相位之间的差值会随着选取不同的液晶材料而有所变化。一旦近场相位发生变化, 远场光斑的光强分布也将受到影响。

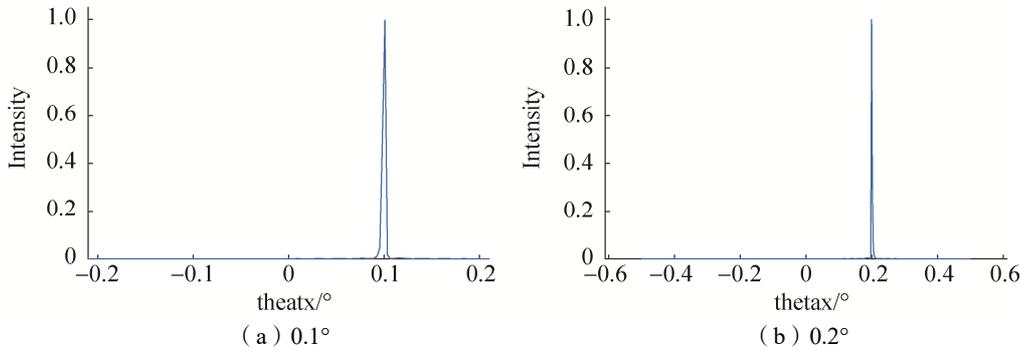


图 8 理想相位分布下的远场偏转

Fig. 8 Far field with ideal phase distribution

图 9 为 5PCH、MLC-624-000 和 UCF-35 三种液晶材料在入射激光功率 $P=110\text{ W}$ ，目标偏转角度 $\theta_0 = 0.1^\circ$ 时，远场光强的分布。结合图 6 (b) -6 (d) 仿真结果可以看出：由于 5PCH 的清亮点在三种液晶材料中最低，相位恶化程度最大，所以远场光斑能量主要分布在 0° 和 0.1° ，目标角度 $\theta_0 = 0.1^\circ$ 处的远场效率仅为 41.3%，且其余旁瓣的能量有所加强。而对于 MLC-624-000 和 UCF-35 两种液晶材料而言，它们的清亮点远高于 110 W 激光入射时的最高温度，相位恶化不明显，所以远场光斑的绝大部分能量仍集中在目标偏转角度，二者远场效率分别为 98.8% 和 92.3%。由于 UCF-35 的清亮点略低于 MLC-624-000，温度敏感性较高，所以 0° 处的光斑能量较 MLC-624-000 略有增加。

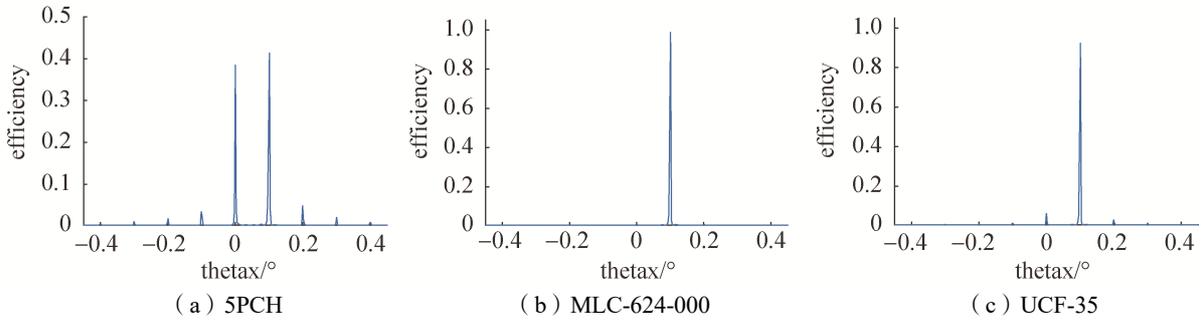


图 9 不同液晶材料的远场偏转

Fig. 9 Far field with different LCs at $P=110\text{ W}$

将图 7 的相位分布进行快速傅里叶变换之后，就可得到 5PCH 液晶材料在 50 W 、 80 W 下的远场偏转，其远场偏转效率分别为 96.8% 和 74.7%，如图 10 所示。通过图 9 (a) 和图 10 可知，随着入射激光功率的提高，远场中除目标角度外，其他级次的光斑能量逐渐增加， 0° 的旁瓣最先出现，其余级次的旁瓣随后也开始出现。当工作温度接近液晶清亮点时，光斑能量主要集中在原点和目标偏转角度上，且二者能量强度差异不大。

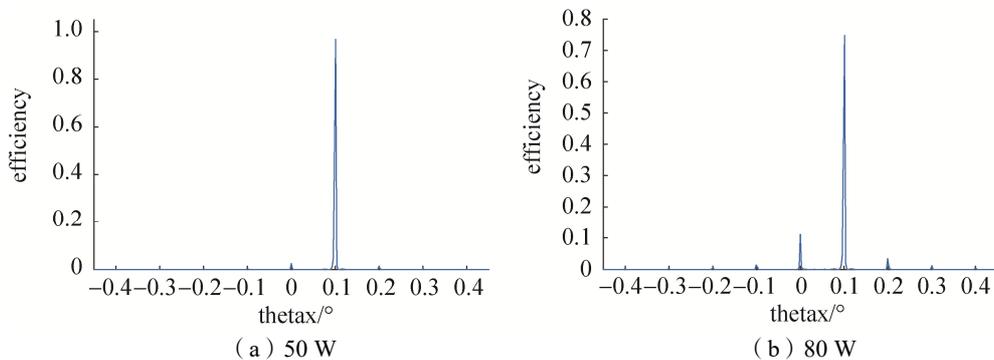


图 10 不同功率的远场偏转

Fig. 10 Far field at different laser powers

3 热致动态分布

3.1 远场的偏转过程

前面提到, 液晶指向矢在电场驱动下的弛豫过程可以通过式 (3) 和式 (4) 描述。通过时域有限差分 FDTD 可以对该耦合方程组进行数值求解。如图 11 所示, 在求解区域内, 沿 z 和 t 方向划分出均匀网格, 将式 (3) 和式 (4) 转化成下列差分方程:

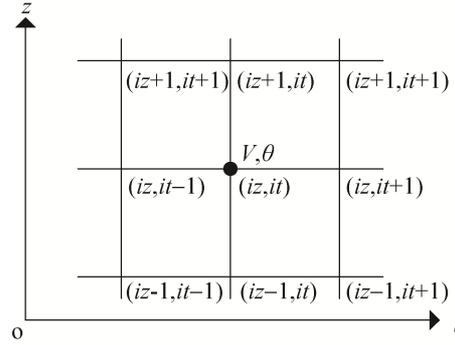


图 11 时域有限差分网格划分

Fig. 11 Meshing grid of FDTD

$$\theta_{iz,it+1} = \theta_{iz,it} + \frac{k}{\gamma} \frac{\theta_{iz+1,it} - 2\theta_{iz,it} + \theta_{iz-1,it}}{\Delta z^2} \Delta t + \frac{\Delta \varepsilon}{\gamma} \left(\frac{V_{iz+1,it} - V_{iz-1,it}}{2\Delta z} \right)_{iz,it} \sin \theta_{iz,it} \cos \theta_{iz,it} \Delta t \quad (19)$$

$$V_{iz,it+1} = \frac{V_{iz+1,it} + V_{iz-1,it}}{2} - \frac{(\varepsilon_{\parallel} - \varepsilon_{\perp}) \sin 2\theta_{iz,it+1} (\theta_{iz+1,it+1} - \theta_{iz-1,it+1})}{8(\varepsilon_{\perp} \sin^2 \theta_{iz,it+1} + \varepsilon_{\parallel} \cos^2 \theta_{iz,it+1})} (V_{iz+1,it} - V_{iz-1,it}) \quad (20)$$

带入对应的初始条件、边界条件和 COMSOL 仿真的温度数据后, 便可以通过数值计算的方法得到在高功率激光入射下, 不同时刻的液晶指向矢分布, 从而得到时间维度上的光束偏转过程。

以波束从 0.1° 偏转到 0.2° 为例, 首先根据式 (18) 得到偏转 0.1° 时液晶相控阵每根电极上的理想相位, 然后通过图 4 所示的电压—相位曲线, 查找到每根电极所加载的电压 U_{0i} ; 接着通过功率为 P 的激光入射器件时的温度分布, 得到此时液晶的相关材料参数; 随后将 U_{0i} 作为初始条件, 结合式 (19)、(20) 求解出 P 功率下, 经过时间 t_0 后, 目标偏转角度为 0.1° 的液晶指向矢的稳态分布 θ_m ; 然后, 重复上述步骤, 得到偏转 0.2° 时电极的加载电压 U_{1i} , 将 θ_m 和 U_{1i} 作为新的初始条件, 再次通过式 (19)、(20) 计算出不同时刻 t 下液晶指向矢的分布 θ'_m ; 最后根据 θ'_m 计算出不同时刻器件的相位分布, 就能得到波束从 0.1° 到 0.2° 的偏转过程。其中, m 表示数值计算中 LCOPA 所划分的网格数目。

为了定量描述波束从初始角度 $\theta_0 = 0.1^\circ$ 偏转到目标角度 $\theta_1 = 0.2^\circ$ 这一过程的时间响应特性, 将初始时刻波束在 θ_0 处的能量记作 P_0 , 偏转稳定后在 θ_1 处的能量记作 P_1 , 从 $10\% P_1$ 到 $90\% P_1$ 的这段时间定义为上升时间 t_{rise} , 从 $90\% P_0$ 到 $10\% P_0$ 的这段时间定义为下降时间 t_{drop} , 从 $90\% P_0$ 到 $90\% P_1$ 的这段时间定义为切换时间 t_{sw} 。

图 12 展示了 50 W、80 W 和 110 W 三种不同功率激光从 0.1° 偏转到 0.2° 的时间响应过程。从图 12 可以看出, 波束能量并不只在 0.1° 和 0.2° 两个级次间变化, 而是所有级次均参与的一个能量再分配过程。此外, 随着功率的增加, 原点处的光束能量逐渐增强, 这使得稳定后的远场效率大大降低。表 2 给出了三种不同入射激光功率下, 液晶光学相控阵的上升时间 t_{rise} 、下降时间 t_{drop} 和切换时间 t_{sw} 。根据表 2 可知, 入射激光功率的增加会缩短相控阵的下降时间 t_{drop} 。这是由于随着激光功率的增大, 使得液晶的工作温度升高, 降低了液晶的粘滞系数。同时, 从表 2 还可看出, 因为三种条件下的控制电压都为偏转 0.2° 的电压阵列, 而 t_{rise} 和 t_{sw} 主要受末态电压决定, 所以相控阵的上升时间 t_{rise} 和切换时间 t_{sw} 并没有随着激光功率的不同而出现明显变化。

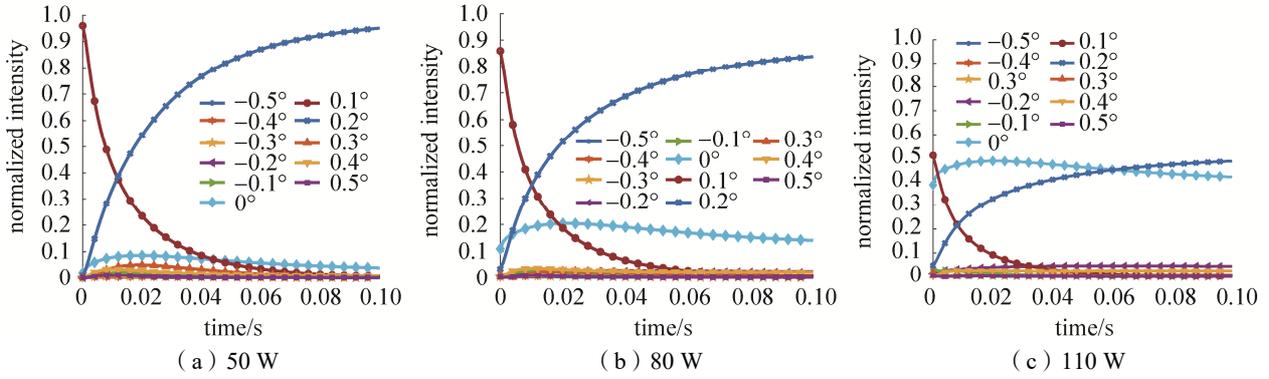


图 12 不同功率的波束偏转过程

Fig. 12 Beam steering process at different laser powers

3.2 材料敏感性分析

不同液晶材料的波束偏转过程如图 12 (c) 和图 13 所示, t_{rise} 、 t_{drop} 和 t_{sw} 也在表 2 中列出。从仿真结果可知, 在 110 W 激光入射下, 5PCH、MLC-624-000、UCF-35 的上升时间分别为 55.31 ms、66.42 ms 和 10.23 ms; 三种材料的下降时间分别为 29.10 ms、48.18 ms 和 5.56 ms; 三种材料的切换时间分别为 56.32 ms、65.48 ms 和 10.39 ms。从上述结果可得, UCF-35 的时间响应特性最佳。

表 2 不同条件下的 LCOPA 响应特性

Table 2 Response performance of LCOPA under different conditions

条件	t_{rise} /ms	t_{drop} /ms	t_{sw} /ms
50W-5PCH	53.75	36.32	55.17
80W-5PCH	54.73	33.18	55.81
110W-5PCH	55.31	29.10	56.32
110W-MLC-624-000	66.42	48.18	65.48
110W-UCF-35	10.23	5.56	10.39

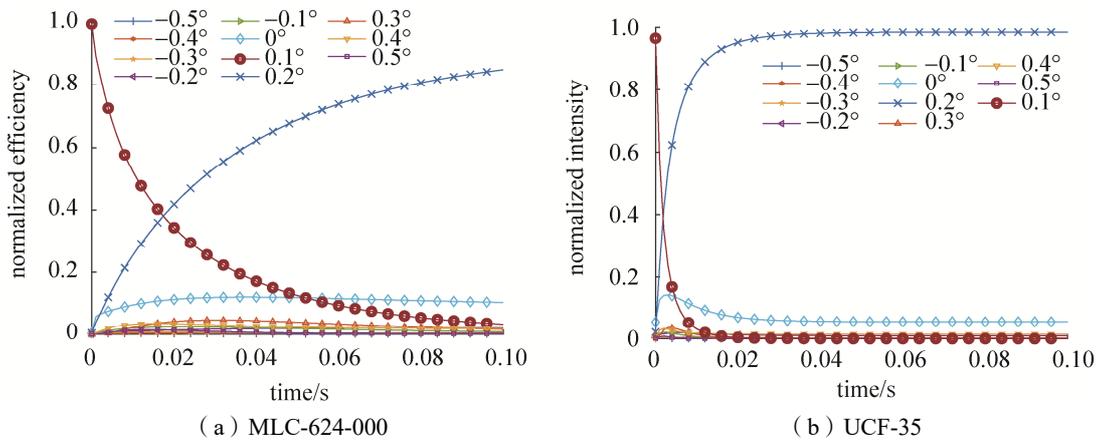


图 13 不同液晶材料的波束偏转过程

Fig. 13 Beam steering process at different LCs

4 结束语

本文针对高功率激光入射液晶光学相控阵的场景, 建立了 LCOPA 的热力学模型, 得到了器件工作温度与入射激光功率间的数值关系, 从而根据 Ericksen Leslie 动力学理论和液晶材料的温度效应, 结合前面的热力学仿真结果, 对不同功率和不同液晶材料下的波束指向特性进行了分析。仿真结果表明, 当入射激光功率从 50 W 增加到 110 W 时, 器件工作温度会逐渐接近液晶材料的清亮点, 相控阵调制的近场相位会出现明显恶化, 导致远场偏转效率从 96.8% 下降到 41.3%。另外, 由于温度越高, 液晶的粘滞系数越小, 所以缩短了相控阵的下降时间。但是由于切换时间主要由末态的控制电压决定, 这使得切换时间并不会随着入射激光功率的改变产生明显变化。

参考文献

- [1] XIAO Feng, KONG Lingjiang, CHEN Jian. Beam-steering efficiency optimization method based on a rapid-search algorithm for liquid crystal optical phased array[J]. Applied Optics, 2017, 56(16): 4585–4590.
- [2] SHI Y, ZHANG J, ZHANG Z. Experimental analysis of beam pointing system based on liquid crystal optical phase array[J]. Photonic Sensors, 2016, 6(4): 289–294.
- [3] WIGHT D R, HEATON J M, HUGHES B T, et al. Novel phased array optical scanning device implemented using GaAs/AlGaAs technology[J]. Applied Physics Letters, 1991, 59(8): 899–901.
- [4] VASEY F, REINHART F K, HOUDRE R, et al. Spatial optical beam steering with an AlGaAs integrated phased array[J]. Applied Optics, 1993, 32(18): 3220–3232.
- [5] VORONTSOV M. Adaptive photonics phase-locked elements (APPLE): System architecture and wavefront control concept[C]//Target-in-the-Loop: Atmospheric Tracking, Imaging, and Compensation II. SPIE, 2005, 5895: 589501.
- [6] HE X, WANG X, 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.
- [7] ZHOU Z, WANG X, ZHUO R, et al. Theoretical modeling on the laser-induced phase deformation of liquid crystal optical phased shifter[J]. Applied Physics B, 2018, 124(3):1–9.
- [8] WANG X, WU L, HE X, et al. Theoretical analysis on power stability and switch time of the non-mechanical beam steering using liquid crystal optical phased array[J]. Liquid Crystals, 2018,45(10): 1477–1486.
- [9] 孙玉宝. 液晶显示器动力学响应研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2010.
- [10] LI J, GAUZA S, WU S T. Temperature effect on liquid crystal refractive indices[J]. Journal of applied physics, 2004, 96(1): 19–24.
- [11] WU S T, LACKNER A M, EFRON U. Optimal operation temperature of liquid crystal modulators[J]. Applied Optics, 1987, 26(16): 3441–3445.

[作者简介]

张梦雪 1997年生, 硕士研究生, 主要研究方向为液晶光电子器件和应用。

王浩 1999年生, 硕士研究生, 主要研究方向为液晶光电子器件和应用。

汪相如 1983年生, 博士, 博士生导师, 教授, 主要研究方向为液晶光电子器件、控制及应用。

(本文编辑: 潘三英)