

向列相液晶器件光调制性能研究

王 萧, 鲁小鑫, 张雪凤, 王 浪, 乌日娜

(沈阳理工大学 理学院, 沈阳 110159)

摘要: 液晶的折射率易受外加电压和温度的影响, 据此可获得电场和温度可调制器件。为改善液晶器件对光的调制性能, 制备了向列相液晶器件, 并对其调制性能进行理论模拟和实验研究。首先研究液晶器件的透过光强和相位延迟随电压变化关系, 结果显示, 相同电压下, 增大器件厚度, 光强调制曲线的峰谷数增多, 相位调制量增大, 其中电压在 0.8 ~ 3 V 范围内, 相位延迟曲线变化较明显, 厚度为 4、6 和 10 μm 的器件可分别获得约 1.21π 、 1.87π 和 3.19π rad 的相位调制量。其次对厚度为 4 μm 的器件进行温度可调制性能的研究, 结果显示, 温度从 20 $^{\circ}\text{C}$ 升至 45 $^{\circ}\text{C}$ 时, 获得的温度可调制量约为 0.29π rad。改变电场或温度均能引起液晶的折射率变化, 从而实现对光的调控, 适当增加液晶器件厚度可获得较大的相位调制量。研究结果对液晶光调制器件的性能改善及应用具有重要参考意义。

关键词: 液晶光调制器; 向列相液晶; 光强调制; 相位调制

中图分类号: O753+.2; TN761 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1003-1251.2024.01.014

Study on Optical Modulation Performance of Nematic Liquid Crystal Devices

WANG Xiao, LU Xiaoxin, ZHANG Xuefeng, WANG Lang, WU Rina

(Shenyang Ligong University, Shenyang 110159, China)

Abstract: The refractive index of liquid crystal is susceptible to the voltage and temperature, and the electric field and temperature modulable devices can be obtained. In order to improve the optical modulation performance of liquid crystal devices, nematic liquid crystal devices are fabricated, and their modulation performance is theoretically simulated and experimentally studied. Firstly, the relationship between the light intensity and phase delay of the liquid crystal device and the voltage is studied. Under the same voltage, increasing the thickness of the device, the number of peaks and valleys of the light intensity modulation curve increases, and the phase modulation amount increases. In the range of 0.8 ~ 3 V, the phase delay curve changes obviously. Devices with thickness of 4, 6 and 10 μm can get phase modulation of about 1.21π , 1.87π and 3.19π rad, respectively. Secondly, the temperature modulation performance of 4 μm device is studied. When the temperature increases from 20 $^{\circ}\text{C}$ to 45 $^{\circ}\text{C}$, the temperature modulation amount is about 0.29π rad. Therefore, changing the electric field or temperature can cause the refractive index of the liquid crystal to change, so as to realize the regulation of light. A larger phase modulation can be obtained by appropriately increasing the thickness of the liquid crystal device. The research results are important refer-

收稿日期: 2023-04-20

基金项目: 2022年辽宁省“揭榜挂帅”科技计划重点项目; 沈阳理工大学光选科研团队建设项目; 辽宁省博士科研启动基金项目 (2021-BS-161)

作者简介: 王萧(1999—), 女, 硕士研究生; 乌日娜(1978—), 通信作者, 女, 教授, 博士, 研究方向为液晶物理与器件。

ence for the performance improvement and application of liquid crystal optical modulators.

Key words: liquid crystal light modulator; nematic liquid crystal; light intensity modulation; phase modulation

液晶是介于液体与晶体之间的一种物质状态,兼有液体的流动性和晶体的各向异性^[1],已经在显示领域得到了广泛应用^[2]。在非显示领域,基于液晶材料的光调制器件备受关注^[3-4]。液晶光调制器中多采用向列相液晶,这是因为向列相液晶取向有序、黏度小且流动性好,其分子的排列和运动比较自由,对外界作用(电、磁场等)相当敏感^[5]。

根据器件结构模式的不同,液晶光调制器件一般分为平行排列、垂直排列和扭曲排列三种模式。其中,扭曲排列器件广泛用于光强调制,在全彩色全息显示系统中^[6],扭曲排列向列相液晶光调制器通过控制电压可以实现光强的衰减,进而实现理想的颜色重建,但在器件厚度有限的情况下其相位调制有限,可降低平均强度透射值来提高相位深度^[7]。垂直排列器件可用作高对比度调幅^[8],液晶分子最初垂直于取向层,在电场作用下发生旋转,由于所需液晶材料的负介电各向异性值较小,导致阈值电压较高^[9]。平行排列器件随电场的增加,液晶分子逐渐与施加电场方向一致,当入射光的偏振方向平行于液晶光轴时,器件对光产生纯相位调制;当入射光偏振方向与液晶光轴呈 45° 时,器件可实现对入射光相位与光强的共同调制^[10],此时光强透射率最大。因此,当器件结构模式不同时,器件的调制能力也不同。综合考虑器件对入射光光强和相位调制的易操作性及广泛应用性,平行排列模式比其他模式更有优势。

液晶器件作为显示器和光学器件的基本原理相同,均为液晶分子在外电场作用下取向发生变化,从而对入射光进行调制。因此,模拟液晶分子取向(指向矢空间分布)对器件光调制性能的研究具有重要的指导意义。求解指向矢空间分布的方法有牛顿法、松弛法和差分迭代法等^[11-12]。牛顿法采用指向矢的倾角和扭曲角来描述指向矢的空间取向,但通用性较差。松弛法采用指向矢的三个分量来描述液晶指向矢的空间取向,其通用性较牛顿法好,但引入时间参量和旋转黏滞系数,需在求解中不断调整黏滞系数、时间和步长的关系以使计算收敛。差分迭代求解法不仅具有稳定性好、速度快、结果准确等特点,且通用性较强。

本文设计制作了平行排列的向列相液晶器件作为光调制器,通过理论和实验相结合研究不同厚度、不同温度下器件对入射光光强和相位的调制性能。

1 液晶器件结构及模拟

1.1 向列相液晶器件结构

液晶器件结构如图1所示,主要包括上下玻璃基板、ITO透明导电膜层、PI取向层和液晶分子层。液晶分子层使用介电各向异性为正的E7液晶材料(江苏和成显示科技有限公司),上下PI取向层反方向平行进行摩擦,通过ITO透明电极给液晶分子施加驱动电压。初始状态(无驱动电压)液晶分子长轴沿平行于基板的方向排列。液晶器件的制作过程主要包括清洗ITO玻璃基板、旋涂PI取向剂、加热固化、摩擦取向、制成空盒、灌注液晶并封口。通过喷洒规格分别为 4 、 6 、 $10\ \mu\text{m}$ 的间隔子(桂林知益光电纳米科技有限公司)控制液晶器件的厚度。

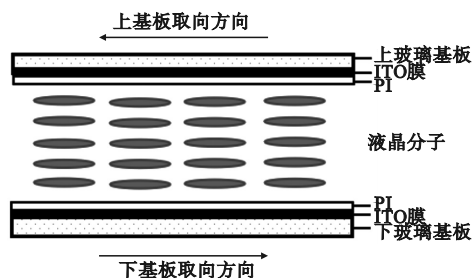


图1 液晶器件结构示意图

Fig. 1 Diagram of the structure of liquid crystal device

液晶器件光调制原理:当一束偏振光垂直入射到器件时,会产生双折射现象,分成寻常光(o 光,光的传播遵循折射定律,其折射率表示为 n_o)和非寻常光(e 光,光的传播不再遵守折射定律,其折射率表示为 n_e)。由于 o 光和 e 光所对应的折射率不同,将产生一定相位差,也称为相位延迟。液晶器件置于正交偏振器(起偏器与检偏器正交)之间,透过率 T_{\perp} 为

$$T_{\perp} = \sin^2(2\beta) \sin^2(\delta/2) \quad (1)$$

式中: δ 为相位差; β 为偏振器与液晶指向矢的夹角。当 $\beta = 45^\circ$ 时, T_{\perp} 最大,可表示为

$$T_{\perp} = \sin^2(\delta/2) \quad (2)$$

当液晶层厚度为 d 时,该器件所能达到的最大相位差 δ 可表示为

$$\delta = \frac{2\pi d}{\lambda} \Delta n \quad (3)$$

式中: d 为器件液晶层厚度,即器件厚度; λ 为入射光波长; Δn 为 e 光与 o 光折射率之差,即折射率各向异性。液晶分子排列方向随电压的不同而变化,使得 Δn 相应发生变化,因此可通过控制外加电压大小对入射光进行调控,液晶材料的折射率和液晶器件厚度决定了相位调制和光强调制。

1.2 理论模拟

根据液晶连续弹性体理论^[13],采用差分迭代对液晶指向矢的空间分布进行计算,得到向列相液晶指向矢角度分布及电压分布的基本方程,经离散化并转换为^[14]

$$V_i = \frac{(V_{i-1} - V_{i+1})}{2} -$$

$$\frac{1}{4} \frac{\Delta \varepsilon \sin \theta_i \cos \theta_i (V_{i+1} - V_{i-1}) (\theta_{i+1} - \theta_{i-1})}{(\varepsilon_{\parallel} \sin^2 \theta_i + \varepsilon_{\perp} \cos^2 \theta_i)} \quad (4)$$

$$\theta_i = \frac{(\theta_{i-1} - \theta_{i+1})}{2} +$$

$$\frac{1}{16} \sin 2\theta_i \frac{(K_{33} - K_{11}) (\theta_{i+1} - \theta_{i-1})^2 + \Delta \varepsilon (V_{i+1} - V_{i-1})^2}{(K_{11} + (K_{33} - K_{11}) \sin^2 \theta_i)} \quad (5)$$

式中: V_i 代表第 i 个节点的电压; θ_i 代表第 i 个节点的指向矢角度; K_{11} 、 K_{33} 分别为展曲、弯曲弹性系数; ε_{\parallel} 、 ε_{\perp} 分别为液晶材料的平行、垂直介电常数; $\Delta \varepsilon$ 为液晶材料介电各向异性, $\Delta \varepsilon = \varepsilon_{\parallel} - \varepsilon_{\perp}$ 。

该迭代方程组以玻璃基板表面强锚泊为边界条件,以未加电压时的指向矢分布为求解的初始值,设定相关参数值,利用迭代计算可求得外加电场作用下液晶指向矢的空间分布。E7 液晶材料的模拟仿真参数设定为 K_{11} (pN) = 7.1, K_{33} (pN) = 11.1, ε_{\parallel} = 13.0, ε_{\perp} = 2.3, n_e = 1.680, n_o = 1.517; 预倾角设置为 2° ; 外加电压的范围为 0 ~ 15 V, 每 1 V 递增。液晶器件的指向矢分布如图 2 所示,液晶分子的倾斜角以中间层呈轴对称分布,中间层分子倾斜角随电压变化最为明显,靠近器件边缘处倾斜角的变化较小。当电压增至约 6 V 时,三个厚度器件中间层液晶分子的倾斜角均接近于 90° ,此时液晶分子的指向矢几乎趋于所加电场方向。

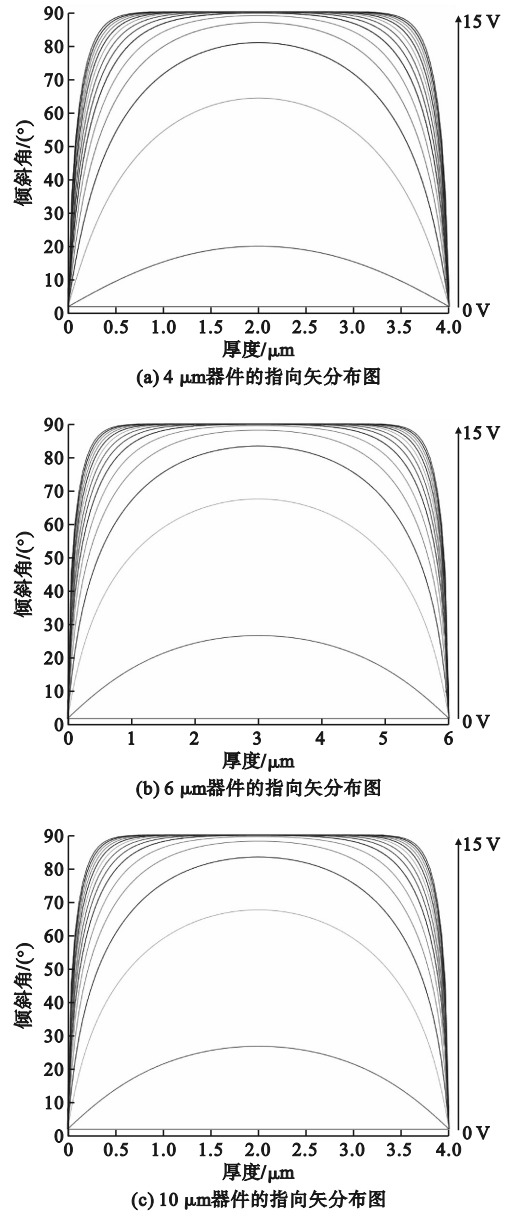


图 2 液晶器件的指向矢分布图

Fig. 2 Director distribution of liquid crystal devices

基于液晶指向矢分布,进一步模拟分析器件的光调制性能,即光强和相位延迟随电压的变化关系,如图 3 所示。

由图 3(a) 可知,三种液晶厚度器件的阈值电压均在 0.8 V 左右。这是由于平行排列向列相液晶器件的阈值电压和器件厚度无关。阈值电压^[15] V_{th} 表示为

$$V_{th} = \pi \sqrt{\frac{K_{11}}{\Delta \varepsilon}} \quad (6)$$

式中 V_{th} 为阈值电压。

当外加电压小于 0.8 V 时,三种厚度器件的光强无明显变化。这是由于此时电压较小,不足以改变液晶分子平行排列取向状态。电压大于

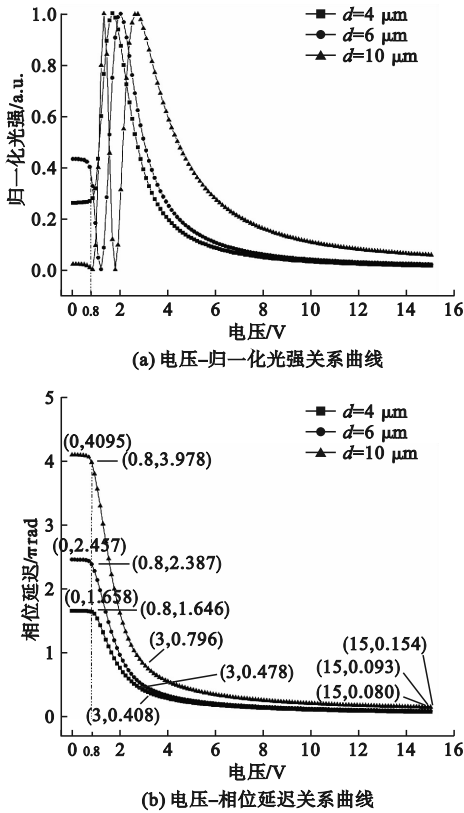


图3 液晶器件的光调制性能模拟

Fig. 3 Optical modulation performance simulation of liquid crystal devices

0.8 V 时,随电压的增加,4 μm 液晶器件的光强先增大后减小,曲线存在 1 个波峰;6 μm 器件的光强先减小后增大随后减小,曲线存在 1 个波峰和 1 个波谷;10 μm 器件光强先稍减小再增大至最大值,之后减小再增大,最终逐渐减小,曲线存在 2 个波峰和 2 个波谷。随着器件厚度的增加,光强曲线呈现峰谷的数目增加。当电压增至 6 V 时,光强变化明显变缓,当电压继续增大,光强减小到一定程度趋于稳定,此时液晶分子排列与电场方向基本一致。

由图 3(b) 可知,三种厚度的器件,其相位延迟随着电压的增大整体呈下降趋势。当外加电压小于 0.8 V 时,相位延迟变化不明显。在 0.8 ~ 3 V 范围内,曲线变化较明显且近似线性,此时三种厚度的器件相位调制量分别约为 1.24π 、 1.91π 和 3.18π rad。当电压继续增大至 15 V,相位调制量分别可达到 1.58π 、 2.36π 和 3.94π rad。外加电压相同时,器件相位调制量随着厚度的增大而增大。

1.3 光调制性能测量

光调制性能测量实验装置如图 4 所示。由半导体激光器(MDL-III-793-1W,长春新产业光电技

术有限公司)发出的激光首先经过孔径光阑调节光束范围,再经分光镜分成两束光,一束被光功率计 1(LPE-1A 激光功率能量计,北京物科光电技术有限公司)接收,实时测量激光功率以保证入射光的稳定;另一束沿光路依次经起偏器 P1、液晶器件、检偏器 P2、孔径光阑后被光功率计 2(LPE-1A 激光功率能量计,北京物科光电技术有限公司)接收。由信号发生器(AFG3011C,泰克)提供 1 kHz 方波电压,温度控制装置调节器件温度(温度范围:室温 ~ 100 $^{\circ}\text{C}$,精度:全范围 $\leq \pm 0.5\%$)。

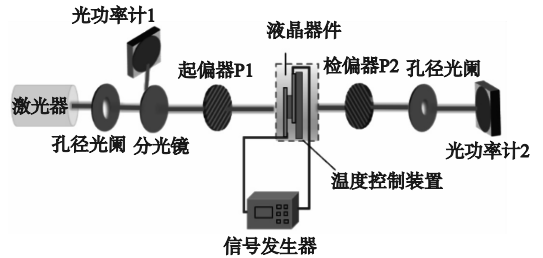


图4 实验装置图

Fig. 4 The diagram of experimental devices

在测量器件的光强随电压变化曲线时,首先调整起偏器和检偏器的偏振方向正交,即 $P1 \perp P2$,在光路中放置液晶器件,使其液晶层分子指向矢方向与偏振器 P1、P2 呈 45° ,即 $\beta = 45^{\circ}$ 。在器件两端施加 1 kHz 的方波电压,改变外加电压的大小,采用光功率计测量透过光强,得到光强随电压变化曲线。由温控装置控制器件温度,测量不同温度下的光强随电压的变化曲线。

2 实验结果及分析

实验中,入射激光波长为 795 nm,液晶器件厚度分别为 4、6、10 μm ,测得正交偏振下归一化光强随着电压变化曲线如图 5 所示。

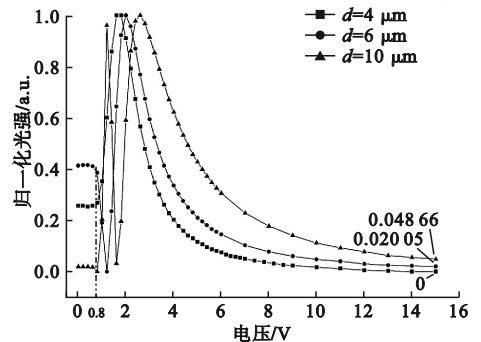


图5 器件电压-归一化光强关系曲线

Fig. 5 Voltage-normalized intensity relation curves of the device

由图 5 可知,当电压约为 0.8 V 时,正好对应于液晶分子指向矢发生变化的阈值电压,光强开始发生明显变化。电压大于 0.8 V 时,4 μm 液晶器件光强曲线出现 1 个波峰;6 μm 器件曲线出现 1 个波峰和 1 个波谷;而 10 μm 器件出现了 2 个波谷和 2 个波峰。电压增至 15 V 时,4 μm 器件光强减小至约 0,6 μm 器件光强减小至约 0.02,10 μm 器件的光强减小至约 0.05。此时透射光强较小,说明液晶分子趋于沿电场方向排列。实验测得曲线和前面模拟结果基本一致。

平行排列的器件,当透过光强随电压变化时,相位延迟也随之发生变化。根据式(2),由归一化光强直接计算得到的相位延迟值域为 $[0, \pi]$,并不能反映光经过液晶器件后实际的相位。因此,根据式(2)求得相位延迟值 δ_0 之后,再按照下列公式^[16]计算得到实际的相位延迟。

$$\delta = \begin{cases} 2k\pi + \delta_0, & \delta_0 \in [2k\pi, \pi + 2k\pi] \\ 2(k+1)\pi - \delta_0, & \delta_0 \in [\pi + 2k\pi, 2\pi + 2k\pi] \end{cases}$$

$$k = 0, 1, 2, 3, \dots \quad (7)$$

式中: δ 为光经过器件后实际的相位延迟值; δ_0 为由归一化光强直接计算得到的相位延迟值。

器件电压 - 相位延迟关系曲线如图 6 所示。

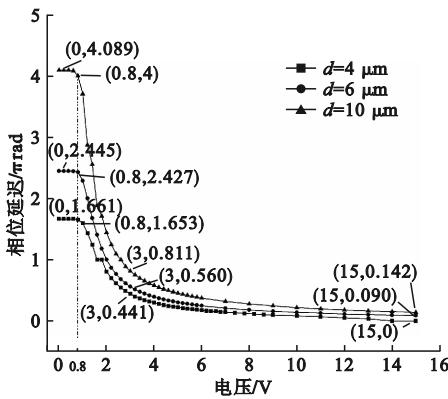


图 6 器件电压 - 相位延迟关系曲线
Fig. 6 Voltage-phase delay relation curves of the device

由图 6 可知:电压小于 0.8 V 时,不同厚度的器件相位延迟变化均不明显;电压在 0.8 ~ 3 V 时,器件相位延迟变化很快且近似线性,对应相位调制量分别约为 1.21π 、 1.87π 和 3.19π rad;此后,随着电压增大,相位延迟逐渐减小且趋于稳定不变。在 0 ~ 15 V 内,器件的相位调制量分别约为 1.66π 、 2.36π 和 3.95π rad。实验测量结果和模拟结果基本一致。

折射率各向异性 Δn 也是温度 T 的函数,即 Δn 将随 T 发生变化,从而获得温度可调的液晶光

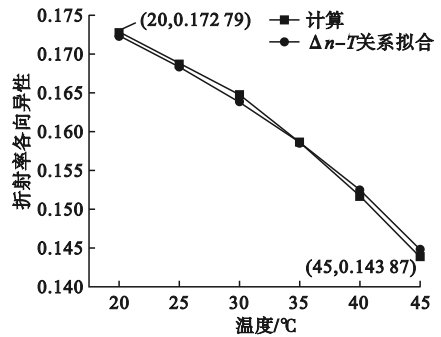
调制器件。根据 Haller 方程^[17], $\Delta n - T$ 关系表示为

$$\Delta n(T) = (\Delta n)_0 (1 - T/T_c)^\beta \quad (8)$$

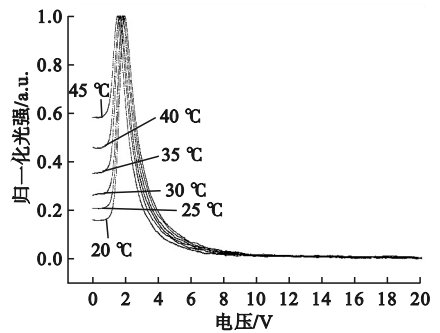
式中: $\Delta n(T)$ 是液晶材料在温度影响下的折射率各向异性; $(\Delta n)_0$ 是 $T=0$ K 时液晶材料的折射率各向异性; β 是与液晶材料相关的常数; T_c 是液晶材料的清亮点(E7 液晶材料的清亮点为 59 °C)。

针对厚度为 4 μm 器件,研究其在不同温度下的调制性能,结果如图 7 所示。

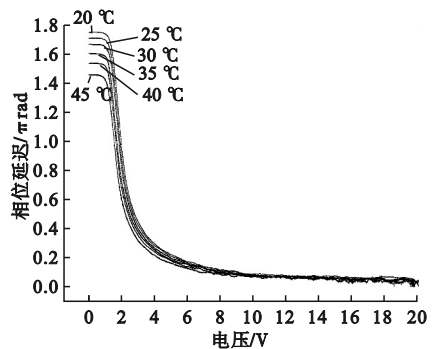
由图 7(a)可知,温度从 20 °C 升至 45 °C 时,液晶器件折射率各向异性约由 0.173 减小至 0.144,且随温度变化曲线符合 $\Delta n - T$ 关系规律。由图 7(b)可知:外加电压为 0 V 时,随着温度由 20 °C 升至 45 °C,透过光强约由 0.16 增大至 0.58,这是由于温度升高,折射率各向异性减小;同一温度下,随着电压增大,光强先增大后减小,出现 1 个峰值。由图 7(c)可知,外加电压为 0 V 时,相位延迟随温度的升高而减小。在 0.8 ~ 3 V 范围



(a) 温度-折射率各向异性关系曲线



(b) 电压-归一化光强关系曲线



(c) 电压-相位延迟关系曲线

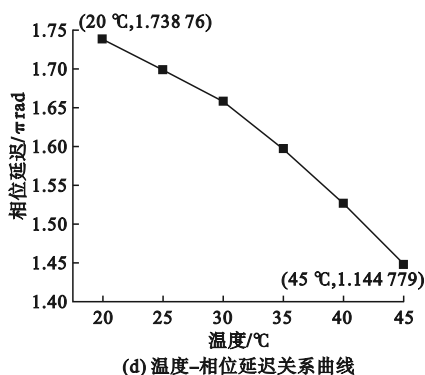


图7 厚度为4 μm 器件不同温度下的调制性能
Fig.7 Modulation performance of 4 μm device at different temperatures

内,相位延迟变化近似线性;当外加电压增至20 V时,不同温度下器件的相位延迟值几乎相同,均在0~0.04π rad范围内,说明此时液晶分子沿电场方向排列。由此可得,器件在相同电压范围内的相位调制量随着温度的升高而减小。由图7(d)可知,无外加电压时,相位延迟约从1.74π减小至1.45π rad,获得温度可调制量约为0.29π rad。

3 结论

制作了向列相液晶材料E7的平行排列液晶光调制器件,结合指向矢分布和电光特性曲线模拟以及相关实验测量,研究了器件的光调制性能。得到结论如下。

1) 795 nm激光入射时,液晶器件光强和相位延迟随电压变化而变化,且液晶器件厚度越大,光强调制曲线中峰谷数越多,对应相位调制量越大。实验结果与模拟结果基本一致。

2) 对厚度为4 μm器件进行了不同温度下光调制性能的研究。温度从20 °C升至45 °C,无电压作用时的透过光强约由0.16增大至0.58,相位延迟约从1.74π rad减小至1.45π rad,温度可调制量约为0.29π rad。

3) 改变施加电压或温度均使液晶折射率发生变化,从而实现对人射光光强和相位的调制。增加液晶器件厚度可获得更大的相位调制量,而控制器件温度可获得小范围的精细调制。

参考文献 (References):

[1] 郑皓天,张松,徐挺.可调谐电磁超表面研究进展[J/OL].光学学报,2023;1-21.[2023-05-10].<https://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1252.O4.202-30509.1118.056.html>.

ZHENG H T,ZHANG S,XU T. Advances in tunable electromagnetic metasurfaces[J/OL]. Acta Optica Sinica,2023;1-21[2023-05-10].<https://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1252.O4.20230509.1118.056.html>. (in Chinese)

[2] KOBAYASHI S,MIYAMA T,AKIYAMA H,et al. Development of liquid crystal displays and related improvements to their performances[J]. Proceedings of the Japan Academy Series B,Physical and Biological Sciences,2022,98(9):493-516.

[3] 张梦梦,刘梦,杨丽丽,等.液晶材料在智能光学器件中的应用研究进展[J].材料导报,2022,36(18):206-214.

ZHANG M M,LIU M,YANG L L,et al. Research progress of liquid crystal materials' applications in smart optical devices[J]. Materials Reports,2022,36(18):206-214. (in Chinese)

[4] 周源,李润泽,于湘华,等.基于液晶空间光调制器的光场调控技术及应用进展(特邀)[J].光子学报,2021,50(11):9-40.

ZHOU Y,LI R Z,YU X H,et al. Progress in study and application of optical field modulation technology based on liquid crystal spatial light modulators (Invited)[J]. Acta Photonica Sinica,2021,50(11):9-40. (in Chinese)

[5] 范志新.液晶器件工艺基础[M].北京:北京邮电大学出版社,2000.

[6] WANG D,LIU C,CHU F,et al. Full color holographic display system based on intensity matching of reconstructed image[J]. Optics Express,2019,27(12):16599-16612.

[7] MARTÍNEZ J L,MORENO I,DAVIS J A,et al. Extended phase modulation depth in twisted nematic liquid crystal displays[J]. Applied Optics,2010,49(30):5929-5937.

[8] ARIAS A,PANIAGUA-DIAZ A M,PRIETO P M,et al. Phase-only modulation with two vertical aligned liquid crystal devices[J]. Optics Express,2020,28(23):34180-34189.

[9] ZHANG Z C,YOU Z,CHU D P. Fundamentals of phase-only liquid crystal on silicon(LCOS) devices[J]. Light: Science & Applications,2014,3(10):e213.

[10] 张洪鑫.相位型液晶空间光调制器特性测试方法及波前校正研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2009.

[11] 王谦,何赛灵.液晶指向矢分布的模拟和比较研究[J].物理学报,2001(5):926-932.

WANG Q,HE S L. Simulation and comparison study of liquid crystal director distributions[J]. Acta Physica Sinica,2001(5):926-932. (in Chinese)

[12] 王谦,余飞鸿,郭海成.外电场作用下液晶指向矢分布差分迭代求解及液晶盒视角电光特性研究[J].光子学报,2001(3):311-316.

WANG Q,YU F H,GUO H C. Distribution of the liquid crystal director under applied voltage and its viewing characteristics[J]. Acta Photonica Sinica,2001(3):311-316. (in Chinese)

[13] 高鸿锦,董友梅.液晶与平板显示技术[M].北京:北京邮电大学出版社,2007.

[14] 胡红斌.液晶波前校正器的过驱动研究[D].长春:中国科学院研究生院(长春光学精密机械与物理研究所),2013.

[15] 梁立兵.基于光取向的液晶光电响应特性的研究[D].上海:东华大学,2021.

[16] 龚泳豪.基于光取向技术的高分辨率LCOS空间光调制器制备及特性研究[D].南京:东南大学,2019.

[17] 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.