

文章编号:1007-2780(2020)07-0675-10

铁电液晶光电模式及其应用

郭琦^{1*}, 杜芸梦¹, 赵慧洁¹, CHIGRINOV V G², 郭海成²

(1. 北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100191;

2. 香港科技大学 先进显示与光电子技术国家重点实验室, 香港 999077)

摘要:铁电液晶因具有低电压驱动下的微秒级响应,近年来得到科研工作者的广泛关注,且有望应用于下一代显示及光子学器件领域。本文介绍 3 种典型铁电液晶光电模式,分别为表面稳定型(surface stabilized ferroelectric liquid crystal, SSFLC)、螺旋形变型(deformed helix ferroelectric, DHF)及电致解旋型(electrically suppressed helix, ESH)。对各光电模式的工作原理及对应的电光效应进行详细阐述,如双稳及多稳态响应、连续灰阶调制、高对比度开关等。同时,光控取向技术在铁电液晶器件中发挥着至关重要的作用。相较于传统摩擦取向层,光控偶氮染料取向层可实现非接触的、锚定能有效控制的铁电液晶取向,这为铁电液晶器件的无缺陷、大面积均匀取向提供前期基础。因此,高对比度、高分辨率、快响应的铁电液晶器件在未来的场序彩色显示、微型显示、2D/3D 显示等领域有着广阔应用前景。

关键词:铁电液晶;光控取向;快响应;液晶显示;液晶光学器件

中图分类号:O753⁺.2 **文献标识码:**A **doi:**10.37188/CJLCD.20203507.0675

Electro-optic modes of ferroelectric liquid crystals and their applications

GUO Qi^{1*}, DU Yun-meng¹, ZHAO Hui-jie¹, CHIGRINOV V G², KWOK Hoi-sing²(1. School of Instrumentation and Optoelectronic Engineering,
Beihang University, Beijing 100191, China;2. State Key Laboratory on Advanced Displays and Optoelectronics Technologies,
Hong Kong University of Science and Technology, Hong Kong 999077, China)

Abstract: The ferroelectric liquid crystal (FLC) which has the advantage of a fast response under a low electric field has become one of the most promising candidates of the next generation liquid crystal display (LCD) as well as photonic devices. Three electrooptic modes including surface stabilized FLC (SSFLC), deformed helix ferroelectric (DHF) mode, and electrically suppressed helix (ESH) mode are reviewed with the corresponding electrooptic effects like bi-and multi-stable switching, continuous modulation of grayscale or phase, and high contrast switching. Moreover, the photo-aligning technique is in high demand compared with the traditional rubbing method for FLC devices, since photo-aligning is a non-contact process, which avoids static charges, particles, and contacting damages.

收稿日期:2020-03-20;修订日期:2020-04-15.

基金项目:国家自然科学基金(No.61875004, No.61405009)

Supported by National Natural Science Foundation of China (No.61875004, No.61405009)

* 通信联系人, E-mail: qguo@buaa.edu.cn

With the advantages of controllable anchoring energy, the photoalignment provides FLC samples with uniform alignment and high contrast ratio. The fast FLCs with a high resolution and high contrast can be applied in the next generation display including field sequential color FLC micro-displays as well as switchable 2D/3D televisions.

Key words: ferroelectric liquid crystal; photo-alignment; fast response time; display; photonic devices

1 引言

低功耗、高分辨率、高对比度、快响应等特性一直是新一代显示器件所不断追求的目标^[1-4]。相较于竞争技术,如 OLED、microLED、DLP 等,液晶显示技术在响应速度方面仍有待大幅提高^[5-6]。在显示领域,快响应可有效减弱或消除运动模糊、提高器件的低温特性,以及实现场序彩色方案。场序全彩合成方案,利用人眼的视觉暂留特性,将时间顺序上的 RGB 子帧合成全彩图像,可提高空间分辨率 3 倍以上、提高能量利用率 3 倍及拓宽色域等,需要液晶的响应时间在亚毫秒量级^[3]。快响应液晶在光子学器件领域同样有着广泛需求,尤其对相位调制深度有较严格要求的器件,无法通过降低液晶层厚来满足响应时间的需求,如相位延迟器^[7]、液晶透镜^[8]、波前矫正器^[9]等。因此,近年来有许多致力于提高液晶响应时间的工作见诸发表,如聚合物稳定蓝相液晶^[10-12]、胆甾相的挠曲电效应^[4,13-14]等。铁电液晶由于具有手性特性的液晶分子构成的近晶 C 相,具有优异的电光特性,可同时满足快响应、低功耗、高透过率、高对比度等需求。

铁电液晶,在 20 世纪 80 年代因 Clark 和 Lagerwall 提出的表面稳定型 (surface stabilized ferroelectric liquid crystal, SSFLC) 光电模式而被熟知^[15],之后又因其微秒级响应和双稳态等优异特性而被广泛研究^[16-17]。然而,对取向条件的敏感依赖性导致其大规模应用受限。铁电液晶的有效取向与向列相液晶不同,除了分子指向矢的取向之外,还需考虑近晶层的排列。近年来,随着取向技术的长足进步,尤其是光控取向技术的成熟,一方面非接触式曝光工艺有效避免了缺陷产生,另一方面利用曝光剂量可实现锚定能的调控,使得大面积、高取向质量的铁电液晶获得越来越多的关注,许多具有优异光电特性的铁电液晶器件陆续涌现^[18-20]。

本文对近年来铁电液晶的研究进展进行综述,主要包含 3 种光电模式,表面稳定型、螺旋形变型 (deformed helix ferroelectric, DHF)、电致解旋型 (electrically suppressed helix, ESH),对它们的工作原理进行分析,并针对它们特有的电光特性给出具体应用案例,如双稳/多稳响应、连续灰阶调制、高对比度相位/振幅开关、快响应衍射元件等。

2 铁电液晶光电模式及其工作原理

2.1 表面稳定型铁电液晶光电模式

1980 年,Clark 和 Lagerwall^[15]提出了一种具有双稳态特性的铁电液晶结构,称为表面稳定型铁电液晶 (SSFLC) 模式,如图 1 所示,由于表面锚定的限制,驱动电压撤掉时,液晶分子指向矢仍维持原状;仅当驱动电压极性改变并超过阈值的条件下,表面稳定型铁电液晶在双稳态之间进行切换。表面稳定型铁电液晶结构中,铁电液晶近晶层垂直于基板排列,表面取向层的强锚定使得铁电螺旋完全展开,可等效为具有单轴晶体特性的相位板,光轴方向由最后加载的驱动电压极性决定。在双稳态之间电控切换时,由发极化矢量 P_s 和电场矢量 E 之间的相互作用而产生扭矩,驱动铁电液晶分子指向矢从一个稳态到另一稳态。表面稳定型光电模式存在的一个必要条件是 $d \ll P_0$, 其中 d 是液晶盒厚, P_0 是螺距,以满足铁

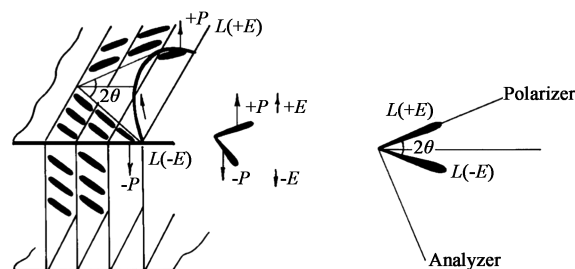


图 1 SSFLC 模式基本结构

Fig.1 Geometry of surface stabilized FLC cell

电液晶螺旋被表面锚定完全展开的条件。

在表面稳定模式下,响应时间正比于材料粘滞系数,即 $\tau \propto \gamma_j$, 其中 γ_j 为铁电液晶旋转粘滞系数;反比于电场及材料自发极化 $\tau \propto 1/P_s E$, P_s 为自发极化矢量, E 为所施加的电场^[15-16]:

$$\tau_r^{(FLC)} = \tau_d^{(FLC)} \propto \gamma_\varphi / P_s E, \quad (1)$$

扭曲向列相(Twist Nematic, TN)的响应时间为:

$$\tau_r^{(N)} \propto 4\pi\gamma_1 / \Delta\epsilon E^2, \quad (2)$$

$$\tau_d^{(N)} \propto d^2 \gamma_1 / K \pi^2, \quad (3)$$

其中: K 是向列相液晶弹性模量, γ_1 是粘滞系数, d 是层厚度。由公式(1)~(3)可见:铁电液晶的响应时间通常在几十到百微秒量级,比向列相液晶的上升时间 τ_r 与下降时间 τ_d 快至少两个数量级。

表面稳定模式铁电液晶的双稳态特性具有许多应用,如电子书、智能穿戴设备等。然而,双稳态响应使其无法利用电压幅度实现灰阶调制,只能采用脉宽调制等手段实现灰阶^[15-17]。同时,表面稳定型铁电液晶对于取向层的锚定能要求较高,无缺陷取向是表面稳定铁电液晶器件普遍面临的难题。

2.2 螺旋形变型光电模式

螺旋形变型(DHF)电光模式的基本结构如图2所示,近晶层垂直于基板排布,铁电液晶螺旋结构在外加电场条件下发生“形变”,即分子指向矢分布随电场改变,从而导致有效折射率的改变。螺旋形变型电光模式存在的一个必要条件是,液晶盒厚要远大于螺距 $d \gg P_0$ ^[21-24]。

将螺旋型变型液晶盒置于正交的起偏和检偏之间,使取向方向,即螺旋结构轴向与起偏方向呈一定角度 β , 此时正入射到样品的光束受铁电液晶调制,呈现透过率随电压幅度的连续灰阶变化^[25-27]:

$$T = \sin^2 \left(\frac{\pi \Delta n(z) d}{\lambda} \right) \sin^2 (2(\beta - \alpha(z))) \quad (4)$$

此种连续灰阶变化,由两种因素导致,一是外加电场作用下,铁电液晶分子指向矢分布改变,导致螺旋结构光轴相对于取向方向发生偏离;二是有效双折射率的改变。使用方位角 $\varphi(z)$ 来描述铁电液晶分子指向矢沿近晶层法线方向的分布。螺旋轴偏离角 α 与有效双折射率 $\Delta n_{\text{eff}} = n_{\text{eff}}(z) - n_\perp$ 均可由指向矢分布计算得出:

$$\alpha = \arctan(\tan\theta \cos\varphi(z)) \quad (5)$$

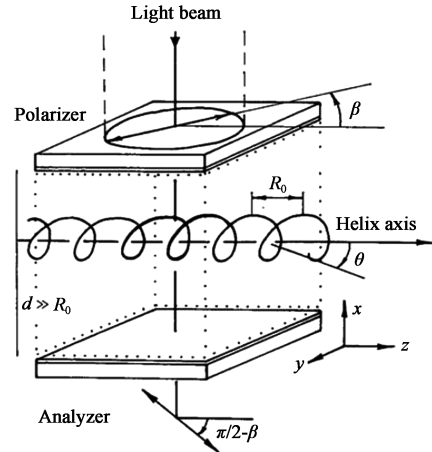


图2 DHF模式基本结构

Fig. 2 Geometry of deformed helix ferroelectric (DHF) LC cell

$$n_{\text{eff}} = \frac{n_{\parallel} n_{\perp}}{[n_{\perp}^2 + (n_{\parallel}^2 - n_{\perp}^2) \sin^2 \theta \sin^2 \varphi]^{1/2}}, \quad (6)$$

此种连续灰阶调制发生在铁电液晶螺旋展开的过程中。

$$E \ll E_U = \frac{\pi^2 K_{22} q_0^2}{16 P_s}, \quad (7)$$

其中: E_U 为电致消旋电场, K_{22} 为铁电液晶弹性系数, $q_0 = 2\pi/P_0$ 为螺旋波矢量, P_s 为自发极化矢量。

在小电场 $E/E_U \ll 1$ 近似下,特征响应时间 τ 与铁电液晶的自发极化矢量 P_s 和电场强度 E 无关,而是仅由材料的旋转粘滞系数 γ_j 和螺距 P_0 决定:

$$\tau = \frac{\gamma_\varphi}{K_{22} q_0^2}, \quad (8)$$

上式仅在螺旋形变型铁电液晶模式中 ($E \ll E_U$) 成立,如果外加电场 E 接近电致消旋电场 E_U , 则铁电液晶螺距 P 会急剧增加,并且响应时间 $\tau \propto E^{-\delta}$ ($0 < \delta < 1$)^[21-22]。

2.3 电致解旋型光电模式

2011年提出的电致解旋型(ESH)铁电液晶光电模式具有高对比度和快响应等特性^[28-29],使其在新型显示器件及光子学器件领域有着广泛应用前景。铁电液晶螺旋结构在电场作用下完全解旋之前,可使其为处于螺旋形变型工作模式。当电压高于消旋电压时,如图3右侧所示,铁电液晶完全消旋,响应时间呈现与电压幅度成反比的规

律,这种规律与表面稳定型类似,区别在于螺旋解旋机制不同。

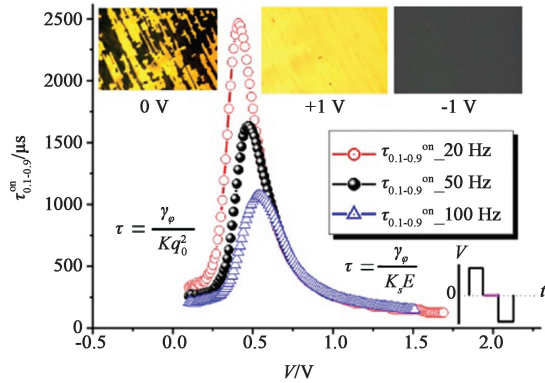


图 3 ESH 模式结构及响应时间随电压变化规律

Fig.3 Dependence of switching on time of ESH cell.

Inset: the FLC layer textures between crossed polarizers.

表面稳定模式和电致解旋模式在初始条件上存在差异,表面稳定型铁电液晶盒的螺旋结构受表面锚定作用而展开,而电致解旋铁电液晶在无外加电场时螺旋结构存在或部分存在,这是电致解旋模式具有高对比度的重要原因。当驱动电压 V 高于螺旋解旋的临界电压 V_c 时,铁电液晶分子指向矢均匀分布。电致解旋型铁电液晶在驱动电压仅为 $\pm 1.5 \text{ V}$ 时,对比度高达 $12\,000:1$ [29]。

实现高质量取向的标准之一是满足螺旋弹性势能相当但不小于取向层的锚定能:

$$Kq_0^2 \geq \frac{2W_0}{d_{\text{FLC}}}, \quad (9)$$

式中: W_0 为锚定能系数,对应图 3 中样品的测量值为 $W_0 = 4 \times 10^{-4} \text{ J/m}^2$ 。

3 铁电液晶的电光效应及应用

3.1 双稳及多稳态效应

表面稳定型结构呈现双稳态特性,即通过施加高于阈值电场的驱动,实现两个稳态之间的相互切换。阈值电场由取向层锚定能和铁电液晶材料特性决定, $E_{\text{th}} = W_d/K^{1/2}$, 其中 K 是平均弹性模量, W_d 是锚定系数 [17]。因此,随着锚定能的增加,所需驱动电场增加,且由于扭矩正比于 $\mathbf{P}_s \mathbf{E}$, 因此双稳态阈值电场与铁电液晶自发极化矢量 $\mathbf{P}_s$ 的值成反比。

具有双稳态性的表面稳定型结构可通过时间上或空间上的平均来实现灰阶 [15-17]。当铁电液晶的自发极化 $\mathbf{P}_s$ 足够高时,可基于铁电畴特性实现多稳态,为被动寻址器件提供灰阶响应 [30]。在螺旋完全展开的书架式结构中(图 1),任意可变的光学灰度可由铁电畴的密度调控实现,如图 4 所示 [31]。当消旋的铁电液晶样品在电压脉冲驱动下,且脉冲宽度小于切换时间时,铁电畴的密度可由电压脉冲宽度控制,产生具有稳态的任意值灰阶,如图 4 所示。

在两正交的偏振片下,由铁电畴导致的准周期结构具有稳态特性,即在驱动电压脉冲撤掉或短路时仍能保持不变。畴界沿近晶层界面切线方向,这也验证了书架结构有且仅有两种可能的铁电液晶分子指向矢方向。在光束尺寸远大于液晶盒厚时,空间平均透过率能够实现连续灰阶调制。连续灰阶不仅可通过电压脉冲宽度实现,也可通过电压脉冲的幅值实现,如图 4 所示。

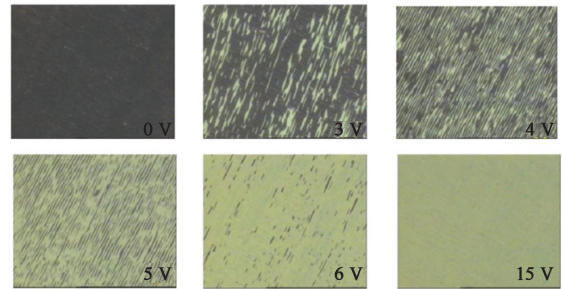


图 4 铁电液晶多稳态效应 [31]

Fig.4 Multi-stable state of FLC with continuous variation grayscale between crossed polarizers [31]

铁电液晶的多稳态响应,通常需要满足两个条件:首先,铁电液晶材料的自发极化值足够高,例如 $\mathbf{P}_s > 50 \text{ nC/cm}^2$; 同时,两个取向状态之间的切换阈值能量较小,这通常出现在反铁电材料中 [15-17]。

铁电液晶器件存在着反式双稳态效应 [32], 如图 5 所示。图 5(a)和(b)展示了传统双稳态和反式双稳态的响应波形。与传统双稳态不同,反式双稳态效应表现出对驱动脉冲的下降沿进行响应。取向层的锚定能和介电性能对于反式稳态效应的存在至关重要 [32]。反式双稳态效应的潜在应用包括低能耗器件,例如电子纸等。此外,传统和反式双稳态的定量区分有助于消除显示器件中

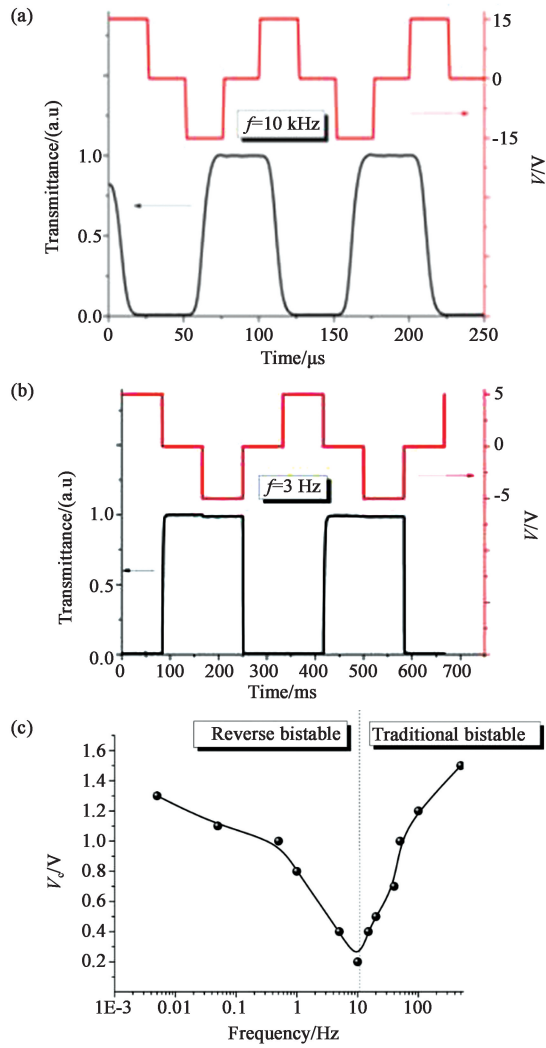


图 5 传统(a)和反式(b)双稳态效应,及其频率依赖特性;(c)具有连续灰阶的铁电液晶多稳态效应^[32]。

Fig.5 Electro-optical response of (a) traditional bistable and (b) reverse bistable FLC; (c) Frequency characteristics of the hysteresis loop width^[32]。

的不完整刷新或鬼像现象。

实验证明,退极化场是产生反式双稳态的原因。考虑对称边界条件下,驱动电压 V_0 实际施加在铁电液晶层的电场幅值 E_{FLC} 为^[32]:

$$E_{\text{FLC}} = \frac{\epsilon' V_0 - 2(\mathbf{P}_s / \epsilon_0) d'}{2\epsilon d' + \epsilon' d} = \frac{V_0}{d} \cdot \frac{1 - 2\mathbf{P}_s d' / V_0 \epsilon' \epsilon_0}{1 + 2\epsilon d' / \epsilon' d}, \quad (10)$$

其中: d 是铁电液晶盒厚度, ϵ 是铁电液晶介电常数, $\mathbf{P}_s$ 是自发极化矢量, d' 和 ϵ' 分别是取向层的

厚度和介电常数。

退极化场为:

$$E_{\text{FLC}}^D = \frac{-2(\mathbf{P}_s / \epsilon) d'}{2\epsilon d' + \epsilon' d}. \quad (11)$$

如图 5(c) 所示,由于自发极化矢量 $\mathbf{P}_s$ 以及介电常数 ϵ 和 ϵ' 等具有频率依赖特性,因此仅在低频驱动条件下才能观察到反式双稳态效应。

3.2 连续灰阶调制

在取向方向平行于起偏方向的情况下 ($\beta = 0^\circ$),螺旋形变型铁电液晶与向列相液晶类似,仅对驱动电压的幅度响应,而对驱动电压的极性不敏感^[26],如图 6 所示。当同时满足 $\alpha(z) = 45^\circ$ 和 $\Delta n(z)d = \lambda/2$ 条件时,在正交的起偏与检偏之间,螺旋形变型铁电液晶可实现透过率在 0 与 100% 的电控调制,如公式(4)所示。对于铁电液晶材料而言,要求最佳的近晶层倾角为 $\theta = 45^\circ$ 。

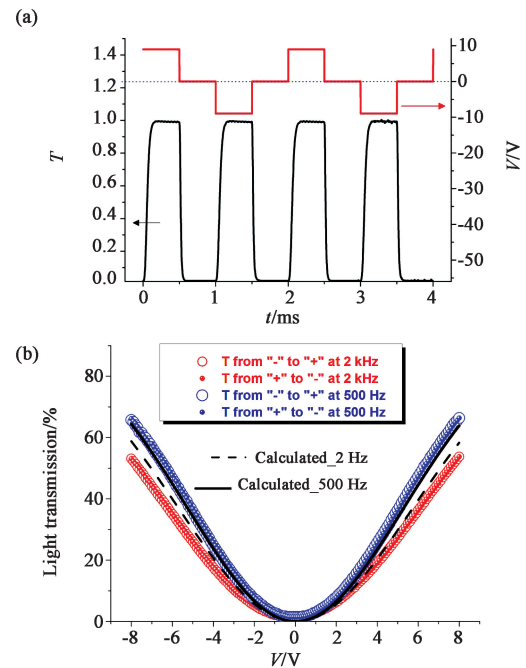


图 6 DHF 光电响应。(a) 透射率波形响应;(b) 透射率随电压变化曲线。

Fig.6 Electrooptic response of DHF. (a) Waveforms of transmittance and driving signal; (b) Transmittance versus voltage curve.

螺旋形变型铁电液晶在较宽的频率范围内,呈现高亮暗态对比度的 V 形光电响应^[33-34],如图 6 所示。此种光电响应与向列相液晶类似,但比向列相液晶的响应速度快两个数量级以上,如开启时间 $\tau_{\text{on}} \approx 80 \mu\text{s}$ 和关闭时间 $\tau_{\text{off}} \approx 60 \mu\text{s}$ 。螺旋

形变型铁电液晶的连续灰阶调制使其在平板显示领域有着广泛应用,如场序彩色显示器件中的 RGB 三原色独立灰阶调控,图 7 给出一种基于螺旋形变型铁电液晶的场序彩色器件驱动方式。

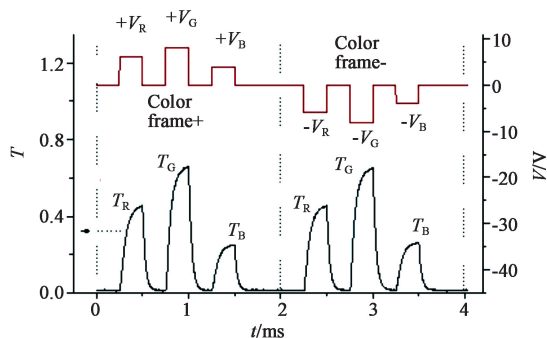


图 7 基于 DHF 的场序彩色显示驱动方案

Fig.7 Driving scheme of DHF for FSC color display

基于螺旋形变型铁电液晶的场序彩色显示,通过把时序的红、绿、蓝三色图像信息合成实现全彩图像^[35],不需要彩色滤光片,因此具有高透过率和空间分辨率。场序彩色显示在帧频为 240 Hz 的情况下,每种颜色的灰阶响应需在 1 ms 以内。在这种情况下,使用电压信号的幅度调制,可以针对每种颜色独立地连续调节透过率,如图 7 所示。

3.3 高对比度相位/振幅开关

电致解旋型铁电液晶模式的高对比度二值响应特性,使其在幅度、相位和偏振的快速调制方面具有优势。例如,放置在偏振片和四分之一波片之间的电致解旋型铁电液晶盒可实现正交圆偏振态之间的快速切换,如图 8 所示^[36],将其放置在无源偏振光栅之前,能实现快速光束转向。在 10 V 以内的电压下,光束转向的开关时间小于 100 μ s。

采用脉宽调制法,可利用电致解旋型铁电液晶作为振幅开关,产生灰阶^[35]。如图 9 所示,可以通过改变液晶盒的亮态时间生成灰阶,进而实现场序彩色显示。可显示的颜色数量取决于液晶开关的响应时间。考虑到电致解旋型铁电液晶盒在 5 V 电压驱动下响应时间低于 50 μ s,可获得较大的色域以及较宽视角。

3.4 快响应衍射光学元件

基于液晶的衍射光学元件近来已有大量文献记载^[37-44]。主要可分为 3 个基本类别:(1)基于液

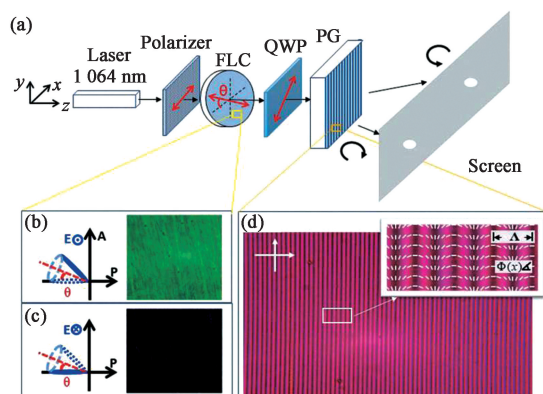


图 8 基于 ESH 的偏振开关及其在光束偏转中的应用^[36]。(a)光路图;(b)(c)外加电场下铁电液晶结构;(d)偏振光栅结构^[36]。

Fig.8 ESH polarization shutter in a beam steering set up^[36]. (a) ESH polarization shutter in a beam steering set up; (b) and (c) FLC textures (right) recorded by polarized microscope with polarizer and analyzer illustrated (left); (d) Texture of PG^[36].

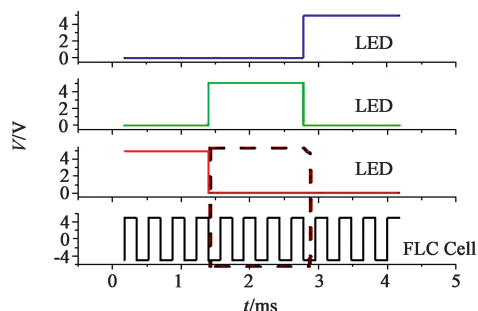


图 9 基于 ESH 的场序彩色显示驱动方案^[35]

Fig.9 Driving scheme of ESH for FSC color display^[35]

晶材料本身周期性结构的衍射光学元件,例如胆甾相等^[37];(2)基于非均匀电场的衍射光学元件,例如图案化电极液晶光栅^[38];(3)基于初始取向的液晶衍射光学元件^[38]。

利用光控取向对铁电液晶螺旋轴进行图案化取向是实现铁电液晶颜色光学元件的有效方法^[41-43]。采用单掩模的两步曝光法,可制备一维、二维铁电液晶光栅^[41]。在此过程中,可以根据应用情况对相邻两区域的取向方向进行任意设计。图 10 展示了制备流程以及周期为 50 μ m 的一维和二维电致解旋型铁电液晶光栅的正交取向区域的微观结构。

动态响应是评估液晶衍射光学元件的十分重

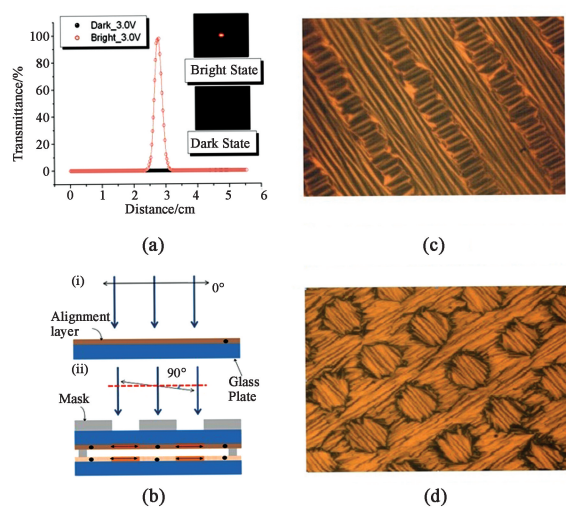


图 10 (a)ESH 光栅衍射分布;(b)制备流程;(c)一维和二维铁电液晶光栅的微观结构^[41]。

Fig.10 Intensity profile of the diffraction of ESH cell; (b) Fabrication procedure of ESH gratings; (c) and (d) Textures of 1D and 2D grating^[41].

要的参数。通过使用均匀涂覆在基底上的 ITO 电极,光栅各衍射级的响应时间类似于均匀取向电致解旋型铁电液晶盒。当施加在液晶盒的电场达到 $6.6 \text{ V}/\mu\text{m}$ 时,切换时间约为 $20 \mu\text{s}$ 。并且可通过提高驱动电压来进一步压缩响应时间^[42,45]。ESH 模式具有切换速度快,对比度高和效率高的优点,可用于各种衍射元件,例如达曼光栅、菲涅耳波片等。基于铁电液晶的菲涅耳透镜如图 11 所示,相邻区域的取向方向夹角为 45° ,图 11 给出了在偏光显微镜下相邻区域的织构和衍射/非衍射状态的图案^[46-47]。利用光取向技术,电致解旋型铁电液晶可实现空间分辨率在亚微米量级的图案化取向^[48],结合其高对比度及快响应等特性,为各种衍射元件的设计和制造提供了高度的灵活性。

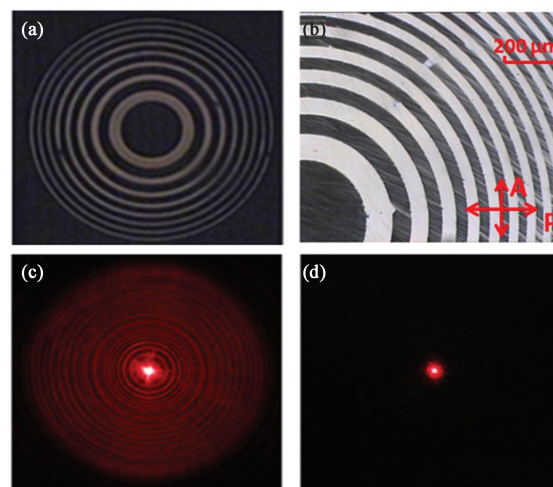


图 11 基于 ESH 的菲涅耳透镜。(a)(b)偏光显微镜下织构;(c)(d)衍射态和非衍射态的衍射图样^[46]。

Fig.11 Fresnel lens based on ESH FLC. (a, b) Illustrate the textures of the ESH Fresnel lens under polarized microscope; (c, d) Photographs of the diffractive and non-diffractive states^[46].

4 结 论

本文对近年来铁电液晶的研究进展进行综述,主要包含 3 种光电模式,表面稳定型、螺旋形变型、电致解旋型,对它们的工作原理进行分析,并针对它们特有的电光特性给出具体应用案例,如双稳/多稳响应、连续灰阶调制、高对比度相位/振幅开关、快响应衍射元件等。光控取向技术的发展为铁电液晶器件的设计及实现提供基础,基于此近年来具有快响应、高对比度、低能耗、宽视角等优异特性的铁电液晶器件被广泛关注,同时展现了在显示及光子学领域的广阔应用前景。

参 考 文 献:

- [1] TAN G J, LEE Y H, ZHAN T, *et al.* Foveated imaging for near-eye displays [J]. *Optics Express*, 2018, 26(19): 25076-25085.
- [2] SONG D H, KIM J W, KIM K H, *et al.* Ultrafast switching of randomly-aligned nematic liquid crystals [J]. *Optics Express*, 2012, 20(11): 11659-11664.
- [3] TAKAHASHI T, FURUE H, SHIKADA M, *et al.* Preliminary study of field sequential fullcolor liquid crystal display using polymer stabilized ferroelectric liquid crystal display [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*,

- 1999, 38(5A): L534-L536.
- [4] CASTLES F, MORRIS S M, GARDINER D J, *et al.* Ultra-fast-switching flexoelectric liquid-crystal display with high contrast [J]. *Journal of the Society for Information Display*, 2010, 18(2): 128-133.
 - [5] HOFMANN U, JANES J, QUENZER H J. High-Q MEMS resonators for laser beam scanning displays [J]. *Micro machines*, 2012, 3(2): 509-528.
 - [6] WU T Z, SHER C W, LIN Y, *et al.* Mini-LED and Micro-LED: promising candidates for the next generation display technology [J]. *Applied Sciences*, 2018, 8(9): 1557.
 - [7] CHEN H S, LIN Y H, SRIVASTAVA A K, *et al.* A large bistable negative lens by integrating a polarization switch with a passively anisotropic focusing element [J]. *Optics Express*, 2014, 22(11): 13138-13145.
 - [8] KOTOVA S P, PATLAN V V, SAMAGIN S A. Tunable liquid-crystal focusing device. 2. Experiment [J]. *Quantum Electronics*, 2011, 41(1): 65-70.
 - [9] WANG L, LIN X W, HU W, *et al.* Broadband tunable liquid crystal terahertz waveplates driven with porous graphene electrodes [J]. *Light: Science & Applications*, 2015, 4(2): e253.
 - [10] HISAKADO Y, KIKUCHI H, NAGAMURA T, *et al.* Large electro-optic Kerr effect in polymer-stabilized liquid-crystalline blue phases [J]. *Advanced Materials*, 2005, 17(1): 96-98.
 - [11] REN H W, LIN Y H, FAN Y H, *et al.* Polarization-independent phase modulation using a polymer-dispersed liquid crystal [J]. *Applied Physics Letters*, 2005, 86(14): 141110.
 - [12] ZHU J L, NI S B, SONG Y, *et al.* Improved Kerr constant and response time of polymer-stabilized blue phase liquid crystal with a reactive diluent [J]. *Applied Physics Letters*, 2013, 102(7): 071104.
 - [13] CHIGRINOV V G, BAIKALOV V A, POZHIDAEV E P, *et al.* Flexoelectric polarization of ferroelectric smectic liquid crystal [J]. *Soviet Physics-JETP*, 1985, 88: 2015-2024.
 - [14] KIM S H, SHI L, CHIEN L C. Fast flexoelectric switching in a cholesteric liquid crystal cell with surface-localized polymer network [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2009, 42(19): 195102.
 - [15] CLARK N A, LAGERWALL S T. Submicrosecond bistable electro-optic switching in liquid crystals [J]. *Applied Physics Letters*, 1980, 36(11): 899-901.
 - [16] LAGERWALL S T. Ferroelectric and antiferroelectric liquid crystals [J]. *Ferroelectrics*, 2004, 301(1): 15-45.
 - [17] CHIGRINOV V G. *Liquid Crystal Devices: Physics and Applications* [M]. Boston: Artech-House, 1999.
 - [18] CHIGRINOV V G, KOZENKOV V M, KWOK H S. *Photoalignment of Liquid Crystalline Materials: Physics and Applications* [M]. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Ltd., 2008.
 - [19] POZHIDAEV E, CHIGRINOV V, HUANG D D, *et al.* Photoalignment of ferroelectric liquid crystals by azodye layers [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2004, 43(8A): 5440-5446.
 - [20] GUO Q, SRIVASTAVA A K, POZHIDAEV E P, *et al.* Optimization of alignment quality of ferroelectric liquid crystals by controlling anchoring energy [J]. *Applied Physics Express*, 2014, 7(2): 021701.
 - [21] PANARIN Y, POZHIDAEV E, CHIGRINOV V. Dynamics of controlled birefringence in an electric field deformed helical structure of a ferroelectric liquid crystal [J]. *Ferroelectrics*, 1991, 114(1): 181-186.
 - [22] POZHIDAEV E P. Electro-optical properties of deformed-helix ferroelectric liquid crystal display cells [C]//*Proceedings of SPIE 4511, Advanced Display Technologies: Basic Studies of Problems in Information Display*. Moscow, Russian Federation: SPIE, 2001: 92-99.
 - [23] BERESNEV L A, CHIGRINOV V G, DERGACHEV D I, *et al.* Deformed helix ferroelectric liquid crystal display: a new electrooptic mode in ferroelectric chiral smectic C liquid crystal [J]. *Liquid Crystals*, 1989, 5(4): 1171-1177.
 - [24] PRESNYAKOV V, LIU Z J, CHIGRINOV V G. Fast optical retarder using deformed-helical ferroelectric liquid crystals [C]//*Proceedings of SPIE 5970, Photonic Applications in Devices and Communication Systems*. Toronto, Canada: SPIE, 2005: 426-435.
 - [25] GUO Q, BRODZELI Z, POZHIDAEV E P, *et al.* Fast electro-optical mode in photo-aligned reflective deformed helix ferroelectric liquid crystal cells [J]. *Optics Letters*, 2012, 37(12): 2343-2345.
 - [26] POZHIDAEV E, CHIGRINOV V. Fast photo-aligned V-shape ferroelectric LCD based on DHF mode [J]. *SID*

- Symposium Digest of Technical Papers*, 2010, 41(1): 387-390.
- [27] HEGDE G, XU P Z, POZHIDAEV E, *et al.* Electrically controlled birefringence colours in deformed helix ferroelectric liquid crystals [J]. *Liquid Crystals*, 2008, 35(9): 1137-1144.
- [28] CHIGRINOV V G, KWOK H S. Photoalignment of liquid crystals: applications to fast response ferroelectric liquid crystals and rewritable photonic devices [M]//KWOK H S, NAEMURA S, ONG H L. *Progress in Liquid Crystal Science and Technology: in Honor of Shunsuke Kobayashi's 80th Birthday*. Singapore: World Scientific, 2013.
- [29] POZHIDAEV E, MINCHENKO M, MOLKIN V, *et al.* High frequency low voltage shock free ferroelectric liquid crystal: a new electro-optical mode with electrically suppressed helix [C]//*Proceedings of the 31st International Display Research Conference* 2011. Arcachon, France; SID, 2011.
- [30] POZHIDAEV E, CHIGRINOV V, HEGDE G, *et al.* Multistable electro-optical modes in ferroelectric liquid crystals [J]. *Journal of the Society for Information Display*, 2009, 17(1): 53-59.
- [31] POZHIDAEV E P, CHIGRINOV V G. Bistable and multistable states in ferroelectric liquid crystals [J]. *Crystallography Reports*, 2006, 51(6): 1030-1040.
- [32] GUO Q, ZHAO X J, ZHAO H J, *et al.* Reverse bistable effect in ferroelectric liquid crystal devices with ultra-fast switching at low driving voltage [J]. *Optics Letters*, 2015, 40(10): 2413-2416.
- [33] CHIGRINOV V G, KWOK H S, YAKOVLEV D, *et al.* LCD optimization and modeling [J]. *Journal of the Society for Information Display*, 2004, 12(2): 183-187.
- [34] KISELEV A D, POZHIDAEV E P, CHIGRINOV V G, *et al.* Polarization-gratings approach to deformed-helix ferroelectric liquid crystals with subwavelength pitch [J]. *Physical Review E*, 2011, 83(3): 31703.
- [35] CHIGRINOV V G, POZHIDAEV E, SRIVASTAVA A K, *et al.* Novel photoaligned fast ferroelectric liquid crystal display [C]//*Proceedings of the 18th International Display Workshops*. Nagoya, Japan: Society for Information Display, 2011.
- [36] GUO Q, XU L, SUN J T, *et al.* Fast switching beam steering based on ferroelectric liquid crystal phase shutter and polarisation grating [J]. *Liquid Crystal*, 2019, 46(9): 1383-1388.
- [37] SRIVASTAVA A K, DE BOUGRENET DE LA TOCNAYE J L, DUPONT L. Liquid crystal active glasses for 3D cinema [J]. *Journal of Display Technology*, 2010, 6(10): 522-530.
- [38] SRIVASTAVA A K, POZHIDAEV E P, CHIGRINOV V G, *et al.* Single walled carbon nano-tube, ferroelectric liquid crystal composites; excellent diffractive tool [J]. *Applied Physics Letters*, 2011, 99(20): 201106.
- [39] SRIVASTAVA A K, CHIGRINOV V G, KWOK H S. Ferroelectric liquid crystal gratings [C]//*Liquid Crystals Photonic Workshop*. Hong Kong: Hong Kong University of Science and Technology, 2012.
- [40] WOLTMAN S J, EAKIN J N, CRAWFORD G P, *et al.* Electro-optical investigations of holographic-polymer-dispersed ferroelectric liquid crystals [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2007, 24(12): 3789-3799.
- [41] SRIVASTAVA A K, HU W, CHIGRINOV V G, *et al.* Fast switchable grating based on orthogonal photo alignments of ferroelectric liquid crystals [J]. *Applied Physics Letters*, 2012, 101(3): 031112.
- [42] MA Y, SUN J, SRIVASTAVA A K, *et al.* Optically rewritable ferroelectric liquid-crystal grating [J]. *EPL (Europhysics Letters)*, 2013, 102(2): 24005.
- [43] HU W, SRIVASTAVA A, XU F, *et al.* Liquid crystal gratings based on alternate TN and PA photoalignment [J]. *Optics Express*, 2012, 20(5): 5384-5391.
- [44] BERESNEV L A, LOSEVA M V, CHERNOVA N I, *et al.* Ferroelectric domains in liquid crystal [J]. *Journal of Experimental and Theoretical Physics Letters*, 1990, 51: 516-521.
- [45] POZHIDAEV E P, KISELEV A D, SRIVASTAVA A K, *et al.* Orientational Kerr effect and phase modulation of light in deformed-helix ferroelectric liquid crystals with subwavelength pitch [J]. *Physical Review E*, 2013, 87(5): 052502.
- [46] WANG X Q, SRIVASTAVA A K, CHIGRINOV V G, *et al.* Switchable Fresnel lens based on micropatterned alignment [J]. *Optics Letters*, 2013, 38(11): 1775-1777.

- [47] SRIVASTAVA A K, WANG X Q, CHIGRINOV V G, *et al.* Switchable liquid crystal Fresnel lens; US, 9933685 [P]. 2018-04-03.
- [48] SHTEYNER E A, SRIVASTAVA A K, CHIGRINOV V G, *et al.* Submicron-scale liquid crystal photo-alignment [J]. *Soft Matter*, 2013, 9(21): 5160-5165.

作者简介:



郭 琦(1987—),女,黑龙江五常人,博士,讲师,2014 年于香港科技大学获得博士学位,主要从事铁电液晶光学器件及光控取向技术的研究。E-mail: qguo@buaa.edu.cn