

文章编号:1007-2780(2025)01-0187-14

超快响应液晶技术研究进展与展望

李晓波¹, 王靖阁², 吴亮³, 胡伟^{1*}

(1. 南京大学 现代工程与应用科学学院, 江苏 南京 210023;

2. 菏泽职业学院, 山东 菏泽 274000;

3. 华为技术有限公司, 广东 深圳 518129)

摘要:液晶显示如今已经成为信息显示工业的主流技术,广泛应用于小尺寸显示器,如计算器、手机、数码相机等;中尺寸显示器,如笔记本电脑和桌面显示器;大尺寸显示器,如直视型电视和投影电视。传统液晶如向列相液晶,胆甾相液晶等,虽对外电场有着快速的响应时间(毫秒量级),但随着人们生活水平的提高,追求更高质量的显示,这就要求液晶具有更快的响应速度以满足高分辨率动态显示。本文系统描述了影响液晶响应时间的要素,重点介绍了几种具有快速响应机制的新型液晶体系,如聚合物稳定蓝相液晶、铁电液晶、铁电向列相液晶和序参数电控效应。最后,展望了快速响应液晶在显示器件和光子学器件中的应用前景。

关键词:快速响应;蓝相液晶;铁电液晶;铁电向列相;序参数

中图分类号:O753⁺.2 文献标识码:A doi:10.37188/CJLCD.2024-0183 CSTR:32172.14.CJLCD.2024-0183

Progress and prospect of ultrafast response liquid crystal technology

LI Xiaobo¹, WANG Jingge², WU Liang³, HU Wei^{1*}

(1. College of Engineering and Applied Sciences, Nanjing University, Nanjing 210023, China;

2. Heze Vocational College, Heze 274000, China;

3. Huawei Technologies Co. Ltd., Shenzhen 518129, China)

Abstract: Liquid crystal display is now the dominant technology for information displays, which is widely used in small size displays, such as calculators, mobile phones, and digital cameras; medium size displays, such as laptops and desktop monitors; large size displays, such as direct-view TV and projection TV. Although traditional liquid crystals, such as nematic liquid crystals and cholesteric liquid crystals, exhibit fast response to electric field, higher quality displays are pursued along with the improvement of the people's living standards. It requires liquid crystals of faster response to satisfy the dynamic display of high resolution. This paper systematically summarizes the factors affecting the LC response, and emphasizes several kinds of new liquid crystals of fast responsiveness, such as polymer stabilized blue phase liquid crystal, ferroelectric liquid crystal, ferroelectric nematic liquid crystal and electric modulation of order parameters.

收稿日期:2024-06-27;修订日期:2024-08-09.

基金项目:国家重点研发计划(No.2022YFA1203703);国家自然科学基金(No.62035008)

Supported by National Key Research and Development Program of China (No.2022YFA1203703); National Natural Science Foundation of China (No.62035008)

*通信联系人, E-mail: huwei@nju.edu.cn

Finally, we rationally anticipate the promising applications of fast response liquid crystals in displays and photonic devices.

Key words: fast response; blue phase liquid crystal; ferroelectric liquid crystal; ferroelectric nematic liquid crystal; order parameter

1 引言

在发明液晶显示器(liquid crystal display, LCD)之前,阴极射线管(cathode ray tube, CRT)显示器是最主要的显示器类型,其具有可视角度大、响应时间短、对比度高等优点,但由于其体积大、重量大、存在辐射等负面原因,逐渐被液晶显示器所取代。液晶是介于液体和晶体之间的一种相态,具有像液体一样的流动性和连续性,同时具有像晶体一样的有序性。任何单体液晶只具有一方面或几方面的优良性能,是无法直接应用于显示的。不过液晶除熔点外的各项性质,如黏度 γ 、介电各向异性 $\Delta\epsilon$ 、双折射 Δn 等具有加和性,因此可以利用多种单晶混配即可获得所需性能的混晶,以达到显示要求。自20世纪末以来,液晶广泛应用于平板显示领域。现今,液晶显示器中所使用的液晶均为混晶^[1],具有宽温域、宽视角^[2]等优点。目前常用的液晶显示器可分为3种:透射式、反射式和透反式。作为典型的透射式液晶显示器,90°扭曲向列相(twisted nematic, TN)液晶被广泛应用于对视角要求不高的笔记本电脑^[3]等方面。但由于TN型液晶显示器响应速度慢(~ 100 ms)、开关不彻底、视角小等缺点,限制了其应用。超扭曲(super twisted nematic, STN)液晶显示器可支持270°扭曲角,大幅提高了电光特性的响应速度,但是视角窄的问题依然存在。为了拓宽观看视角,发展了多畴垂直取向液晶盒(multi-domain vertical alignment, MVA)。富士通公司开发出了突起型多畴垂直取向^[4-5],三星公司也开发出了采用狭缝产生边缘电场的图案化垂直取向(patterned vertical alignment, PVA)^[6]。它们的工作机制相类似,但图案化垂直取向不需要任何物理上的突起,因此具有更高的对比度。

此外,液晶在非显示领域也发挥着重要的作用,如激光加工、光场调控、光信息处理和光通信等,利用液晶特殊的电光/声光/磁光效应,实现对光波的振幅、相位和偏振的灵活调制^[7]。例如,

当前大容量高速光通信对光交叉节点的调度能力要求越来越高,对于核心交换模块-波长选择开关(wavelength selective switch, WSS)的切换速度需要达到毫秒甚至亚毫秒量级,而其中扮演光信号交换的部件就是硅基液晶^[8](liquid crystal on silicon, LCoS)。

无论是显示还是非显示领域,液晶的快速响应特性对于高效、高性能、动态、实时的光信号操控至关重要,也影响其在上述相关领域的进一步应用和发展。由于传统液晶电响应速度慢(毫秒级别),在需要快速响应的应用领域受限,在动态画面显示中高速移动的图像会出现“拖尾”、“重影”等影响视觉效果的现象,严重影响显示质量,不能满足高分辨率动态显示的要求。因此,开发快速电响应的液晶材料与器件已经成为当务之急。本文介绍了几种具有超快电响应的液晶(微秒或纳秒级别),有望应用于场序彩色液晶显示(field sequential color liquid crystal display, FSC-LCD)等需要超快速电响应的领域。

2 影响液晶响应时间的要素

在面内切换(in-plane switch, IPS)模式下,当忽略回流和惯性效应时,根据埃里克森-莱斯利方程,液晶的上升、下降时间分别为^[9]:

$$\tau_{\text{rise}} = \frac{\gamma_1}{\epsilon_0 |\Delta\epsilon| E^2 - \frac{K_{11}\pi^2}{d^2}}, \quad (1)$$

$$\tau_{\text{decay}} = \frac{\gamma_1 d^2}{K_{11}\pi^2}, \quad (2)$$

其中: γ_1 为旋转黏度, $\epsilon_0\Delta\epsilon E^2$ 为电场能量密度, $\Delta\epsilon$ 为介电各向异性, E 为电场强度, K_{11} 为体系的弹性常数, d 为盒厚。根据式(1)和式(2),为了获得更短的响应时间,应该采用低黏弹性系数 γ_1/K_{11} 以及更薄的盒厚 d 。液晶盒的表面有平行取向和垂直取向两种取向方法,虽然表面锚定作用有利于液晶取向,但也影响响应时间。美国中佛罗里

达大学吴诗聪教授从理论上分析了锚定能(W)和盒厚对液晶响应时间的影响,并进行了实验验证^[9]。实验结果表明,在表面锚定能不同的情况下,液晶响应时间 τ 与 d' 成指数函数关系,其中 x

为指数。 x 随锚定能的增大而增大,在极弱或极强的锚定能下, x 分别为1和2,如表1所示。从实验结果可以看出,对于向列相液晶,弱锚定能将导致低阈值电压,上升时间减少,下降时间会增加。

表1 强、弱锚定能对液晶阈值电压(V_{th})、上升时间(τ_r)、下降时间(τ_d)的影响^[9]

Tab. 1 Influence of strong and weak anchoring energy on liquid crystal threshold voltage (V_{th}), rise time (τ_r), fall time (τ_d)

| 参数 | 强锚定($W = \infty$) | 弱锚定($\frac{Wd}{K} \ll 1$) |
|------|---|--|
| 阈值电压 | $\pi \left(\frac{K_{ii}}{\epsilon_0 \Delta\epsilon } \right)^{\frac{1}{2}}$ | $\pi \left(\frac{K_{ii}}{\epsilon_0 \Delta\epsilon } \right)^{\frac{1}{2}} \left(1 - \frac{2K}{Wd} \right)$ |
| 上升时间 | $\frac{\gamma_1}{\epsilon_0 \Delta\epsilon E^2 - \frac{K_{ii}\pi^2}{d^2}}$ | $\frac{\gamma_1}{\epsilon_0 \Delta\epsilon E^2 - \frac{2W}{d}}$ |
| 下降时间 | $\frac{\gamma_1 d^2}{K_{ii}\pi^2}$ | $\frac{\gamma_1 d}{2W}$ |

另外上升时间取决于外加电压 V ,尤其是在阈值电压区域附近。为了克服上升时间缓慢的问题,可以采用过压驱动的方法^[10],给液晶盒施加一个短脉冲高电压,并使透光率维持在所需灰阶水平。在这种情况下,上升时间大幅缩短。同时,在衰减阶段,电压被关断一小段时间,然后施加低电压使液晶盒灰阶维持在所需水平,这被称为下冲电压方法。采用过压驱动和下冲电压方法,响应时间可减小2~3倍。

3 超快响应液晶的研究进展

在各种液晶相中,我们着重介绍了蓝相液晶和铁电液晶两种具备快速响应机制的液晶相,有望应用于快速响应的液晶显示及液晶光子器件。

3.1 蓝相液晶

3.1.1 蓝相液晶的结构

蓝相液晶(blue phase liquid crystal, BPLC)早在1888年就被Reinitzer在胆固醇苯甲酸酯实验中发现^[11],其出现在各向同性相降温至手性向列相的过程中,是具有特征反射色的一个中间相态。由于第一次观察到这种相态时呈现蓝色,故称之为蓝相。在降温过程中,液晶分子自组装形成具有双螺旋结构的双螺旋柱,如图1(a)所示。双螺旋柱进一步堆叠形成三维立方晶格,依次出现蓝相Ⅲ(BPⅢ)、蓝相Ⅱ(BPⅡ)、蓝相Ⅰ(BPⅠ)

3种不同类型的蓝相相态,且分别表现为无规则排列的雾状相、简单立方晶格结构和体心立方结构,如图1(b~d)所示。蓝相液晶具有许多不同寻常的光学性质,具有更快的响应速度(亚毫秒量级)、更宽的视角、不需要表面取向层、光学各向同性等优势,因此与传统的液晶显示器相比,蓝相液晶显示器在未来的显示领域中有更广阔的发展潜力和应用场景^[12]。

3.1.2 蓝相液晶的克尔效应

向列相液晶的指向矢排列随外部电场而改变,与向列相液晶不同的是,蓝相液晶工作的物理机制是电场诱导双折射,既克尔效应^[13]。根据Gerber模型,蓝相液晶的克尔常数由液晶的如下参数决定:

$$K \approx \frac{\Delta n \cdot \Delta \epsilon}{k} \frac{\epsilon_0 P^2}{\lambda (2\pi)^2}, \quad (3)$$

其中: Δn 、 $\Delta \epsilon$ 、 k 、 P 分别为固有双折射率、介电各向异性、液晶主体的平均弹性常数和螺距。响应时间与液晶参数的关系如式(4)所示^[14]:

$$\tau = \frac{\gamma_1 P^2}{K_{ii} (2\pi)^2}, \quad (4)$$

其中, γ_1 是蓝相液晶系统的旋转黏度,与液晶主体和手性掺杂剂的黏度紧密相关。从响应时间的角度考虑,低黏度的蓝相系统往往更有利于得到快的响应时间。然而,大的克尔常数和快速响应之间存在矛盾,只能在这两种性能之间折中。

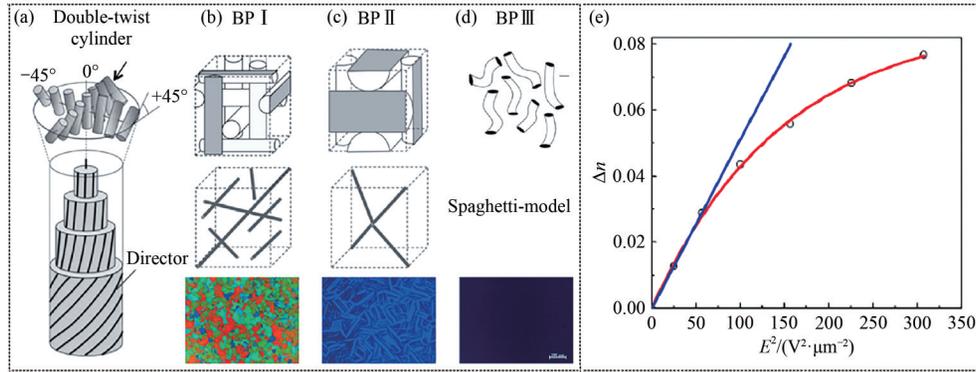


图1 蓝相液晶的晶格结构以及偏光织构照片^[15]。(a) 蓝相液晶分子双螺旋排列形成双螺旋柱；(b) 体心立方结构(BP I)及相应缺陷模式、特征偏光织构照片；(c) 简单立方结构(BP II)及相应缺陷模式、特征偏光织构照片；(d) 无定形态(BP III)及特征偏光织构照片；(e) 测量的诱导双折射(空心圆)、克尔效应线性拟合(蓝线)、拓展克尔效应线性拟合(红线)^[16]。

Fig. 1 Lattice structures and typical POM textures of BPLC^[15]. (a) Schematic arrangement of the double twist cylinders; (b) Body-centered cubic structures, defect mode and typical POM texture of BPI; (c) Sample cubic structures, defect mode and typical POM texture of BP II; (d) Amorphous structure and typical POM texture of BP III; (e) Measured induced birefringence (circles), linear fitting with Kerr effect (blue line) and linear fitting with extend Kerr effect (red line)^[16].

比如,大的 $\Delta\epsilon$ 有利于获得大的克尔常数,但是由于多重极性基团会导致黏度急剧增大,从而导致响应速度变慢。所以在蓝相体系中,必须综合考虑这些参数以开发兼具大克尔常数和快速响应的蓝相液晶。

3.1.3 聚合物稳定蓝相液晶

由于结构中存在缺陷,导致蓝相液晶很不稳定,只存在于一个很小的温度范围(1~2 °C)。在发现蓝相后的很长一段时间内,对其研究一直非常少。聚合物稳定蓝相液晶(polymer stabilized blue phase liquid crystal, PS-BPLC)策略是目前最为有效的拓宽蓝相温域的方法^[17]。在微观上,外电场作用导致蓝相液晶分子重排,从而在宏观上诱导双折射改变。根据克尔效应,诱导双折射率与外加电场的平方成正比^[13]:

$$\Delta n_{\text{ind}} = \lambda K E^2, \quad (5)$$

其中: Δn_{ind} 为诱导双折射率, λ 为波长, K 是克尔常数, E 是外电场强度。此规律在低电场下成立,但随着电场的增加,折射率逐渐饱和,如图1(e)所示。吴诗聪教授针对这一现象提出了拓展克尔效应^[18]:

$$\Delta n_{\text{ind}} = \Delta n_{\text{sat}} \left\{ 1 - \exp \left[- \left(\frac{E}{E_s} \right)^2 \right] \right\}, \quad (6)$$

其中: Δn_{sat} 是饱和双折射率, E_s 是饱和电场。制备聚合物蓝相液晶需要向列相液晶主体、手性剂以

及聚合物单体,每种材料都会对蓝相液晶体系造成性能上的影响。

吴诗聪教授系统性地进行了聚合物单体浓度对PS-BPLC电光性能影响的研究^[19-20],所使用的向列相液晶、手性剂以及聚合物单体如图2(a)所示。实验结果发现,随着聚合物单体浓度的增加,残余双折射减小,响应时间缩短,同时保持了较低的迟滞(~3%),如图2(b)所示。由于聚合物网络锚定作用的增强,导致更高的驱动电压(> 150 V),如图2(c)所示。与此同时,吴诗聪教授研制了一种大克尔常数($K=13.7 \text{ nm}^2/\text{V}^2$)的PS-BPLC复合材料JC-BP01M,并表征了其电光特性^[21]。该材料有效降低了工作电压($V_{\text{rms}} \approx 48 \text{ V}$),且响应时间约为1 ms。这是由于JC-BP01M有着大的 $\Delta\epsilon$,从而导致了较高的黏度。该材料还有着高的对比度(1 000:1),结合凸型电极将进一步降低工作电压(~10 V),因此在下一代显示器和光子器件应用上具有潜力。在聚合物稳定蓝相液晶器件中,迟滞效应是决定显示器件电光性能的关键因素。迟滞的存在限制了器件工作的准确性,影响了器件的长期稳定性。为了解决这一挑战,河北工业大学的Zhao等人^[22]使用一些适当浓度的短链单功能甲基丙烯酸酯单体,在PS-BPLC中形成微尺度网络孔。这些具有微尺度网

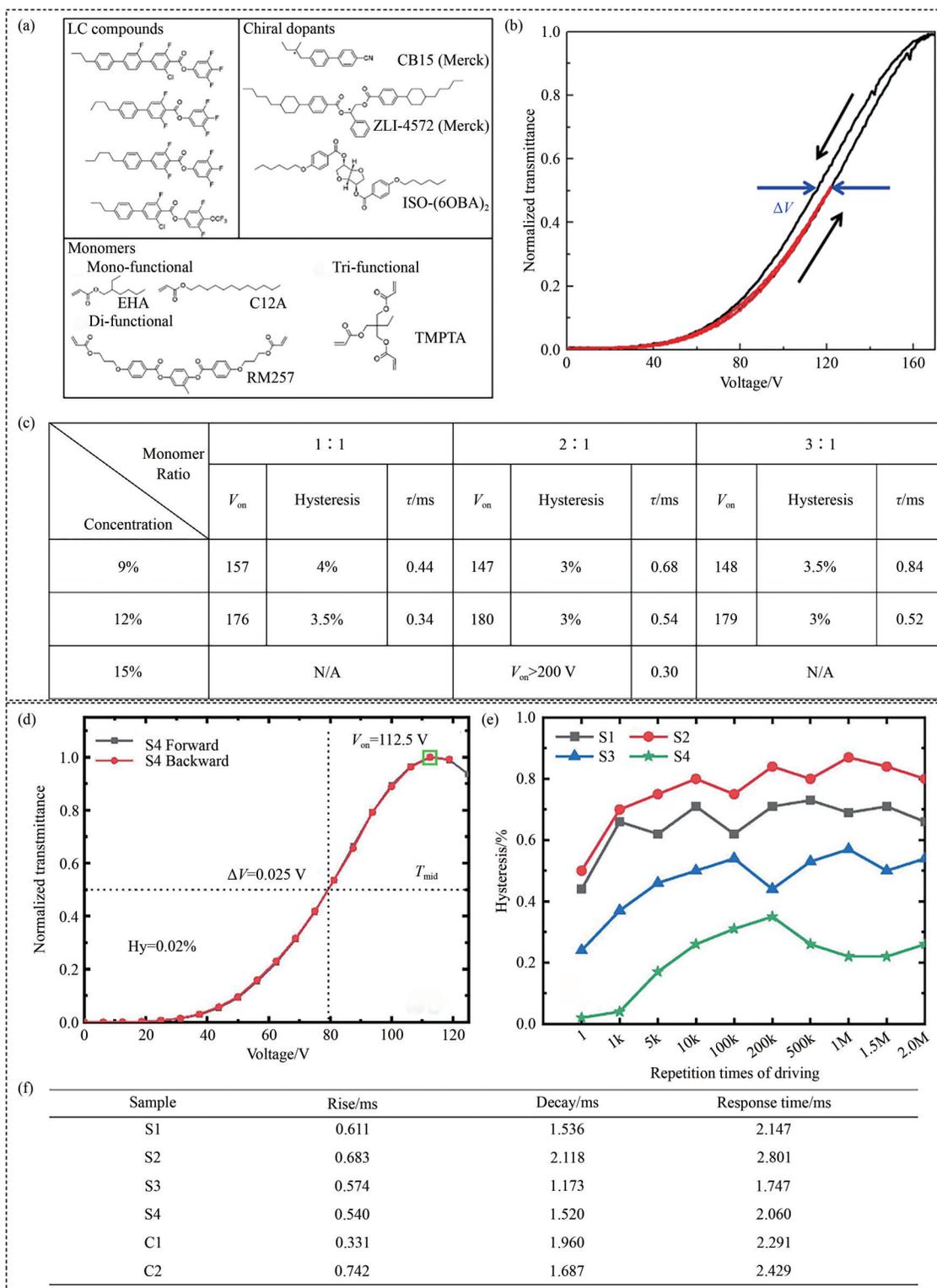


图 2 (a) 向列相液晶母体、手性剂、聚合单体示例^[19]; (b) 迟滞回线, 黑线表示驱动到透光率峰值, 红线表示驱动到 50% 透光率^[20]; (c) 样品的工作电压、迟滞和响应时间^[19]; (d) 样品的电压-透光率曲线和迟滞值^[22]; (e) 样品的循环时间-迟滞曲线; (f) 样品的响应时间。

Fig. 2 (a) Examples of nematic liquid crystals, chiral dopants, and monomers^[19]; (b) Hysteresis loop, black line represents driving to the peak transmittance and red line represents driving to 50% transmittance^[20]; (c) Operation voltage, hysteresis and response time of samples^[19]; (d) Voltage-transmittance curves and hysteresis values of samples^[22]; (e) Hysteresis-repetition times of driving of samples; (f) Response times of samples.

络孔的 PS-BPLC 对于具有非光滑表面的网络表现出低迟滞 ($<0.5\%$), 甚至对于具有光滑表面的网络表现出超低迟滞 ($\sim 0.02\%$), 如图 2(d) 所示。即使经过 200 万次驱动之后, 也具有较小的迟滞和残余双折射, 如图 2(e) 所示。但其并没有表现出超快响应, 速度与传统液晶器件相当 (~ 2 ms), 如图 2(f) 所示。这些发现对于选择合适的功能单体和理解迟滞效应背后的物理机制具有重要意义。

3.2 铁电液晶

向列相液晶以其自身的优势在显示领域广泛应用, 如液晶电视和电脑的显示器。随着人们生活需求不断提高, 向列相液晶在需要快速响应的应用领域受到限制。在各种液晶相中, 铁电液晶 (ferroelectric liquid crystal, FLC) 由于具有永久偶极矩, 其电响应速度比传统向列相液晶快 2~3 个数量级 (快至几十微秒)。对于具有自发极化 P_s 的铁电液晶, 电场 E 内的电能密度为 $-P_s \cdot E$, 铁电液晶的典型自发极化值为 100 nC/cm²。当外场强为 1 V/ μ m 且 P 与 E 平行时, 电能密度为 $|-P \cdot E| = 10^3$ J/m³, 相比于向列相液晶的电致极化效应的电能密度 $\Delta \epsilon E^2 / 4\pi$ 通常高出 2~3 个数量级, 这是铁电液晶具有快速响应的关键原因。另外, 低驱动电压、宽视角、适合高分辨率显示、种类丰富的光电效应与非线性光学效应也使得铁电液晶具有广阔应用前景。

1975 年, Meyer 根据对称性的考虑, 认为由手性分子组成的近晶 C 相 (Smectic C) 具有铁电性^[23]。Meyer 和 Keller 等人合作合成了第一种铁电液晶材料 DOBAMBC (图 3(a)), 从此拉开了铁电液晶材料与器件的研究序幕^[24-25]。在手性近晶 C 相 (Smectic C*) 中, 分子的倾斜角保持不变, 但方位角沿着层法线逐渐改变, 形成螺旋结构, 如图 3(b) 所示。这一性质类似于胆甾相液晶中的螺旋结构。SmC* 相的另一个手性本体特征是沿着每个近晶层的 C_2 对称轴 (极轴) 取向的自发极化 P_s 。FLC 的指向矢有几种不同的排列方式, 如表面稳定型、变形螺旋型、电致解旋型, 从而产生不同的电光效应。

3.2.1 表面稳定型铁电液晶

1980 年, 查尔姆斯理工大学的 Clark 和 Lagerwall 提出了一种新的 FLC 几何结构, 如图 3(c) 所

示。将铁电液晶置于两块间隔很小的玻璃基板中 (<2 μ m), 则铁电液晶的分子取向呈现双稳性^[26-28], 被称为表面稳定型铁电液晶 (surface stabilized ferroelectric liquid crystal, SSFLC)。在该模式下, 铁电液晶对外加电场具有独特的电光特性, 呈现出微秒级的快速响应。在该结构中, FLC 近晶层垂直于基板排列, 螺旋结构被基底表面的强锚定完全展开。当外加电场改变方向时, 指向矢将在两种稳定态之间切换。SSFLC 存在的一个必要条件是盒厚 $d \ll$ 螺距 P_0 , 根据 Goldstone 动力学模型, 可以得到 SSFLC 的响应时间为^[29]:

$$\tau = \frac{\gamma \sin^2 \theta}{P_s E}, \quad (7)$$

其中: γ 为旋转黏滞系数, P_s 为自发极化值, E 为外加电场强度。典型的铁电液晶自发极化值为 $P_s = 100$ nC/cm², 旋转黏滞系数 $\gamma = 0.01$ Pa·s。若近晶层倾斜角 $\theta = 22.5^\circ$, 施加电场 $E = 1$ V/ μ m, 则响应时间 $\tau = 10$ μ s。当利用 SSFLC 进行电光调制时, 通常将起偏器与其中一种排列状态的分子指向矢平行, 如图 3(d) 所示。此时, 处于 A_2 状态的液晶分子的透过率为^[29]:

$$T = \sin^2(4\theta) \sin^2\left(\frac{1}{2} \frac{2\pi \Delta n d}{\lambda}\right), \quad (8)$$

其中: $2\pi \Delta n d / \lambda$ 为相位延迟量。由此可见, 当同时满足倾斜角 $\theta = 22.5^\circ$ 和相位延迟量 $2\pi \Delta n d / \lambda = \pi$ 时, SSFLC 的透射率可达 100%。当盒厚偏离最佳盒厚取值时, 亮态透过率波动非常大, 因此大尺寸 SSFLC 器件对于工艺制备要求较高。

SSFLC 的发现将铁电液晶的研究推向了全新的阶段。波兰华沙董布罗夫斯基军队技术学院的 Katarzyna Gaładyk 等人^[30]通过在啞啞基母体混合物中掺杂 3 种相同浓度、不同种类的手性剂, 得到了倾斜角 θ_{opt} 接近 22.5° 的目标 FLC, 在 SSFLC 的倾斜角为 22.5° 时能获得最高的对比度。在此基础上, 研究 SSFLC 的结构和电光性能。实验结果发现, 在饱和电压下, 3 种掺杂了手性剂的 FLC 都表现出 100 μ s 以内的超快响应性能。北京航空航天大学的 Guo 等人^[27]首次报道了在 FLC 器件中使用均匀光取向的反转双稳态效应。图 3(e, f) 展示了传统双稳态效应和反转双稳态效应。反转双稳态效应表现出两种稳定态, 并通过驱动脉冲的下降边缘在两种状态之间进行切换。取向层的锚定强度和介电特性是反

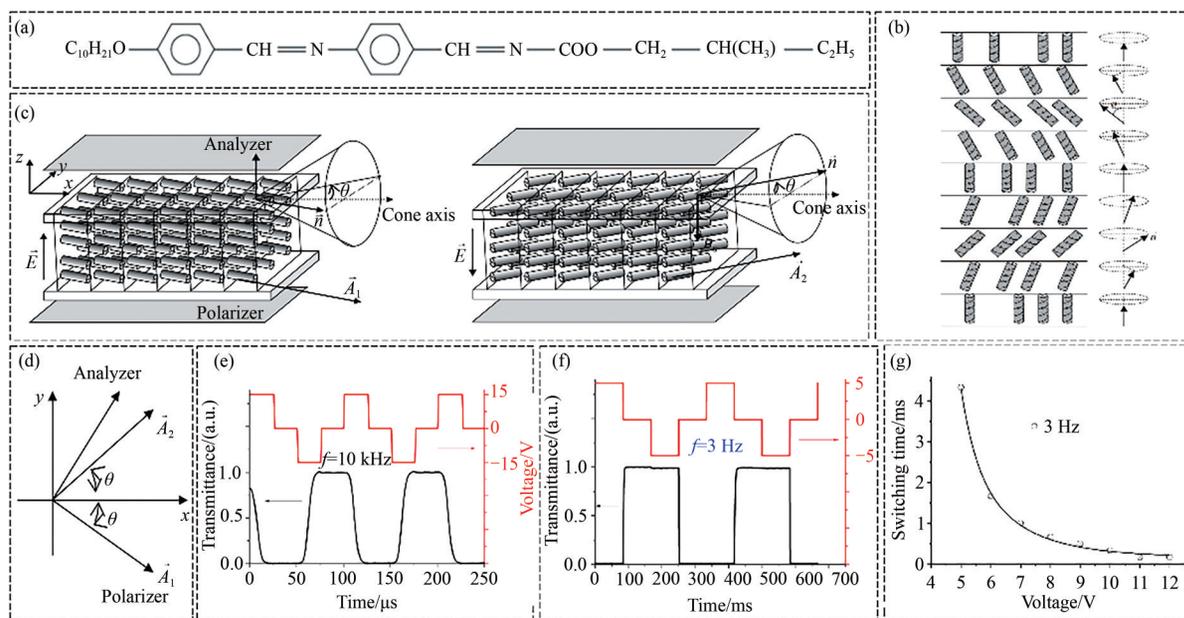


图3 (a) DOBAMBC的分子结构^[25];手性近晶C相液晶结构示意图和SSFLC的书架式排列结构^[26]; (b) 手性近晶C相螺旋结构图及其自发极化矢量的变化规律; (c) SSFLC的指向矢随电场变化示意图; (d) 起偏器和检偏器方向;传统双稳态效应和反转双稳态效应的电光响应^[27]; (e) 传统双稳态效应的电光响应; (f) 反转双稳态效应的电光响应; (g) 不同驱动电压下反转双稳态FLC器件的转换时间。

Fig. 3 (a) Molecular structure of DOBAMBC^[25]; Schematic structure of smectic C* phase LC and the bookshelf arrangement structure of SSFLC^[26]; (b) Smectic C* phase helix structure diagram and the changing regularity of P_s ; (c) Schematic diagram of the SSFLC director switching by electric field; (d) Directions of the polarizer and analyzer; Electro-optical response of traditional bistable FLC and reverse bistable FLC^[27]; (e) Electro-optical response of traditional bistable FLC; (f) Electro-optical response of reverse bistable FLC; (g) Switching time of reverse bistable FLC device under different driving voltages.

转双稳态效应存在的关键。反转双稳态效应在节能装置如电子纸等设计中具有潜在应用。此外,传统双稳态和反转双稳态的明确差异有助于消除双稳态显示器中的不完全刷新或阴像。如图3(g)所示,通过施加11 V的低驱动电压,可以得到响应时间约为160 μ s的超快FLC器件,这在光子学器件和显示器件中具有重要前景。

但表面稳定型铁电液晶显示器并没有广泛实用化,主要原因就是取向困难、抗振能力差、不能实现连续灰度等,而灰度是显示应用中的关键要素。

3.2.2 螺旋形变型铁电液晶

在铁电液晶发现之初,就观察到了铁电液晶螺旋结构在外电场下的变形效应^[31]。利用这种亚毫秒级响应的螺旋形变型铁电液晶(deformed helix ferroelectric liquid crystal, DHFLC)得到了具有连续灰阶的电光调控。DHFLC的结构如图4

(a)所示,DHFLC存在的一个必要前提是盒厚 $d \gg$ 螺距 P_0 。在平行取向的液晶盒中,填充短螺距铁电液晶材料,近晶层平行于 x - y 面,螺旋轴平行于 z 轴。在远离取向层的盒中间,螺旋结构存在且尚未发生形变,此时认为取向层仅对边界附近的液晶分子有锚定作用。对于近晶层垂直于基底排列的结构,FLC的螺旋结构会因外加电场而变形。因此,指向矢方向在 $\pm E$ 电场中对称振荡。此时,DHFLC存在消旋阈值电压^[28],如式(9)所示:

$$E_U = \frac{\pi^2 K_{22} q_0^2}{16 P_s}, \quad (9)$$

其中: K_{22} 为扭曲弹性常数, $q_0 = 2\pi/P_0$ 为螺旋波矢量, P_s 为自发极化矢量。当外加电场远小于 E_U 时,实验证实铁电液晶的螺距随外电场变化不明显^[32]。在接近 E_U 时,螺距随电场明显增加。在远离 E_U 的情况下,DHFLC的响应时间为^[28]:

$$\tau = \frac{\gamma}{K_{22} q_0^2}, \quad (10)$$

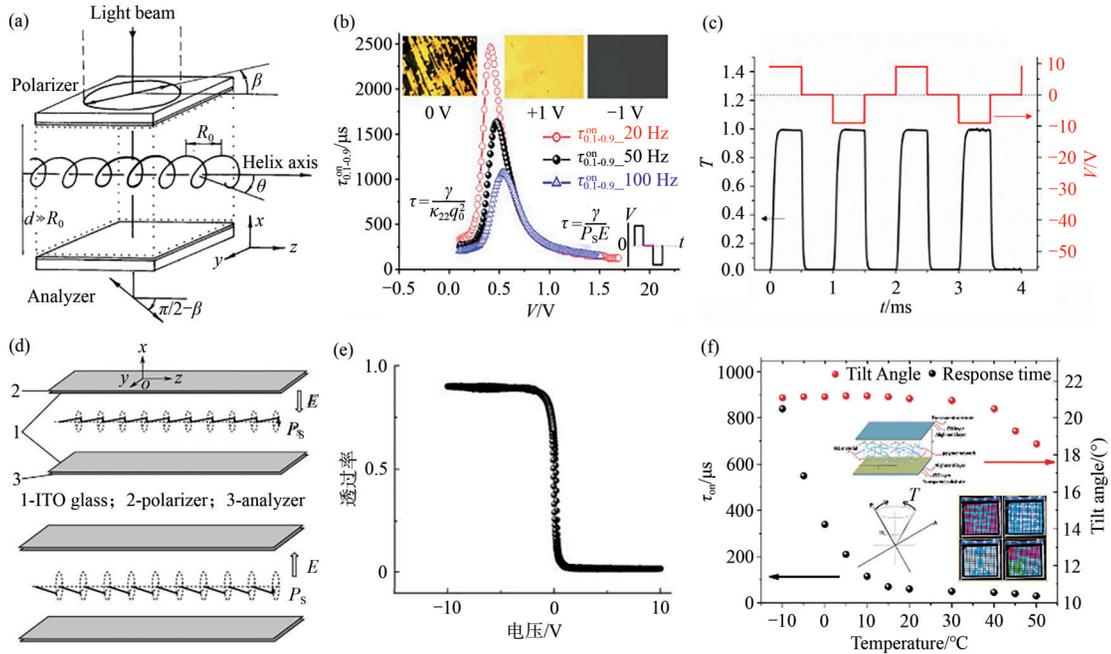


图 4 DHFLC 的结构和电光效应^[33]。(a) DHFLC 结构示意图。(b) 1.5 μm 液晶盒时间-电压曲线。左半部分 ($<0.25\text{ V}$) 为 DHFLC 工作模式, 右半部分 ($>1\text{ V}$) 为 ESHFLC 工作模式。插图: 右下角: 施加的驱动电压波形; 顶部: 不同电压下的 FLC 织构。(c) DHFLC 的电光响应。(d) ESHFLC 结构示意图。(e) ESHFLC 透过率随电压的变化曲线。(f) RPS-ESHFLC 的结构示意图和倾斜角与响应时间对温度的依赖性, 右下角为场序彩色显示模型^[34]。

Fig. 4 Structure and electric-optic effect of DHFLC^[33]. (a) Schematic structure of DHFLC. (b) τ_{on} -voltage curves of 1.5 μm liquid crystal cell. The left half ($<0.25\text{ V}$) is DHFLC working mode and the right half is ESHFLC working mode. Insertions: bottom right ($>1\text{ V}$) is the driving voltage waveform; top is the FLC textures under different voltages. (c) Electro-optic response of the DHFLC cell. (d) Schematic structure of ESHFLC. (e) Transmittance-voltage curve of ESHFLC. (f) Schematic structure of RPS-ESHFLC and the temperature dependence of the tilt angle and response time, bottom right is prototypes of the field sequential color display^[34].

其中, γ 为旋转黏滞系数。由此可见, 响应时间与自发极化 P_s 和外电场 E 无关, 而是由旋转黏滞系数 γ 和螺距 P_0 决定的, 如图 4(b) 左半部分所示。当 FLC 的螺旋结构在低电场下轻微变形时, 它展现出对称的光开关, 如图 4(c) 所示, 透射率与电场强度大小有关, 而与电场强度方向无关^[28]:

$$T = \sin^2 2[\beta + \Delta\alpha(E)] \sin^2 \left(\frac{\pi d \Delta n_{\text{eff}}}{\lambda} \right), \quad (11)$$

其中: β 为取向方向和起偏器偏振方向的夹角, $\Delta\alpha(E)$ 为螺旋轴的偏转, Δn_{eff} 为有效双折射率。

液晶空间光调制器 (spatial light modulator, SLM) 是一种广泛用于空间和时间上调制光波振幅、相位或偏振的器件。通常对于这种器件, 除了需要快的响应, 还要具有 2π 的相位调制量, 以便实现相位在 $0 \sim 2\pi$ 之间的连续变化。香港科技大学的 Sun 等人^[35] 提出一种基于无缺陷的短螺

距 DHFLC 的光轴旋转来实现快速模拟几何相位调制的方法。所提出的无边场效应 (fringe field effect, FFE) 的 DHFLC 液晶空间光调制器响应速度快, 可实现像素尺寸小于 $3\text{ }\mu\text{m}$ 的单色调制。通过优化 DHFLC 材料, 在低电压 ($<7\text{ V}$) 驱动下, 可以实现 1.9π 的相位调制量和 $250\text{ }\mu\text{s}$ 的快速响应。在有源矩阵或硅基底的驱动下, 得到了衍射效率达 77% 的圆偏振定向光栅, 该光栅在大偏转角、高效率光束转向、大带宽 WSS、全息图生成和自适应光学方面展示出巨大的潜力。DHFLC 的快速电光响应具有 V 型变换的特点, 并具有连续的灰度。为了获得 DHF 效果, 在实际器件设计中, 应采用小螺距 ($P_0 < 0.3\text{ }\mu\text{m}$) 和大倾斜角 ($\theta > 30^\circ$) 的铁电液晶材料。这是由于小螺距可以使螺旋结构周期性所产生的布拉格衍射中心波长落在可见光区域外, 大倾斜角使得亮态具有足够的

透过率。V型变换的特性使DHF很可能被应用于下一代有源矩阵场序彩色液晶显示器。

3.2.3 电致解旋铁电液晶

高对比度、快速响应、宽视角、低能耗的液晶光电模式一直都是显示和光子学器件的追求。俄罗斯科学院的Pozhidaev等人^[36]提出一种新型铁电模式称为电致解旋型铁电液晶(electrically suppressed helix ferroelectric liquid crystal, ESH-FLC)。实验发现,当铁电液晶的螺距 P_0 小于或与盒厚 d 相当时,可通过对取向层锚定能的优化,外加正向或反向电场,对FLC的螺旋结构进行完全解旋,获得具有快速响应和高对比度的光电特性,使其有望应用于显示和光子学中。在FLC的螺旋结构被电场完全解开之前,FLC体系在远小于阈值电压 E_U 的区域下工作;当 $E > E_U$ 时,FLC被电场完全解旋,如图4(d)所示。ESHFLC的二值化光电特性与SSFLC相似,但不同之处在于ESHFLC没有明显的迟滞现象,如图4(e)所示。在方波驱动下,在 $E > E_U$ 的情况下,ESHFLC的亮态透过率为^[28]:

$$T = \sin^2(4\theta) \sin^2\left(\frac{\pi \Delta n d}{\lambda}\right). \quad (12)$$

可见,当铁电液晶倾角满足 $\theta = 22.5^\circ$ 且液晶盒厚满足半波条件 $\Delta n d / \lambda = 1/2$ 时,ESH透过率可达100%。由于ESH透过率依赖倾角 θ ,所以 θ 对温度的依赖性使得透过率随温度而发生改变。随着温度升高, θ 逐渐变小,虽然变化不大,但ESH透过率的下降限制了其在显示器件和光子学器件中的应用。为了解决这个问题,香港科技大学的Ma等人^[36]开发一种限制性聚合物稳定ESHFLC(restricted polymer-stabilized ESHFLC, RPS-ESHFLC),在铁电液晶材料中掺杂高分子预聚体,在一定温度下建立了聚合物网络,如图4(f)所示,以实现ESHFLC电光模式的约束。在限定单体浓度(3.5%,质量分数)下,合成的RPS-ESHFLC材料在一定温度范围内提供了优化且稳定的电光参数,且不影响ESHFLC电光模式的其他重要参数。限制性聚合物稳定ESHFLC具有较大的温度范围($-10 \sim 50^\circ\text{C}$)、稳定的高对比度(4 000:1)、快速响应时间(在 50°C 时可达 $40 \mu\text{s}$)、低驱动电压($< 10 \text{ V}$),可望应用于诸多显示和光子器件,如场序彩色显示器和高分辨率显示器(微型投影仪、3D显示器、微显示器),光子

器件如调制器、滤波器、衰减器等。

3.2.4 铁电向列相液晶

铁电性是电介质具备的一种自发极化状态,普遍出现于对称性较低的晶(固)体材料体系。流体或高流动性软材料通常呈现高对称性,因而与铁电性的要求是相违背的。1916年,Born指出了向列相液晶体系中存在铁电性的可能性^[37]。然而,Born提出的铁电向列相模型有别于向列相液晶普遍的形成机制,在当时并没有被接受。其后一百年间,许多科学家致力于铁电性的研究^[23,38-39]。2017年,日本九州大学的Nishikawa等人^[40]在液晶分子DIO中发现一种具有极高介电常数(10^3 Hz 下可达 10^4)的强极性向列相状态,如图5(a)所示,比传统液晶大几百倍。DIO分子的偏光显微镜(POM)图在高温下表现出传统向列相的Schelieren织构,低温下呈现出一种新颖的沙质织构,如图5(b)所示。同时,通过二次谐波干涉测量,证实了DIO在较低温度的极性相中具有类似铁电体的极化切换现象。同一时期,纽约大学的Mandle等人^[41]报道了一种具有大偶极矩的楔形分子RM734,如图5(a)所示。2020年,Clark团队^[42]通过电光实验,首次证实了RM734等形成的低温向列相正是Born所预测的铁电向列相液晶(ferroelectric nematic liquid crystal, NFLC)。NFLC是一种三维单轴向列相,具有自发的、可重新定向的局部极化特性,极化方向与指向矢平行。通过偏光显微镜观察RM734的电光行为,Clark等人首次给出了在向列相液晶中观察到铁电性的特征:(1)在没有外加电场的情况下,形成由不同畴壁分离开的自发极化相反的极性畴区,如图5(c)-A所示;(2)由场致畴区运动导致的极性反转,如图5(c)-B、C所示。2021年,华南理工大学的Satoshi Aya团队^[43]证实了一类新型的强极性手性向列相状态,称为螺旋铁电向列相(helielectric nematic, HN*),如图5(d)所示。通过使用Clark团队所开发的电光方法来检测铁电性,可以观察到反手性畴的成核过程。2024年,美国肯特州立大学的Adaka等人^[44]合成了一种新的铁电向列相RT11165,RT11165与RM734的不同之处仅在于RM734二号位的甲氧基被异丙氧基取代,如图5(a)所示。这种微小的结构变化引起了巨大的相变行为差异,NF相存在的温

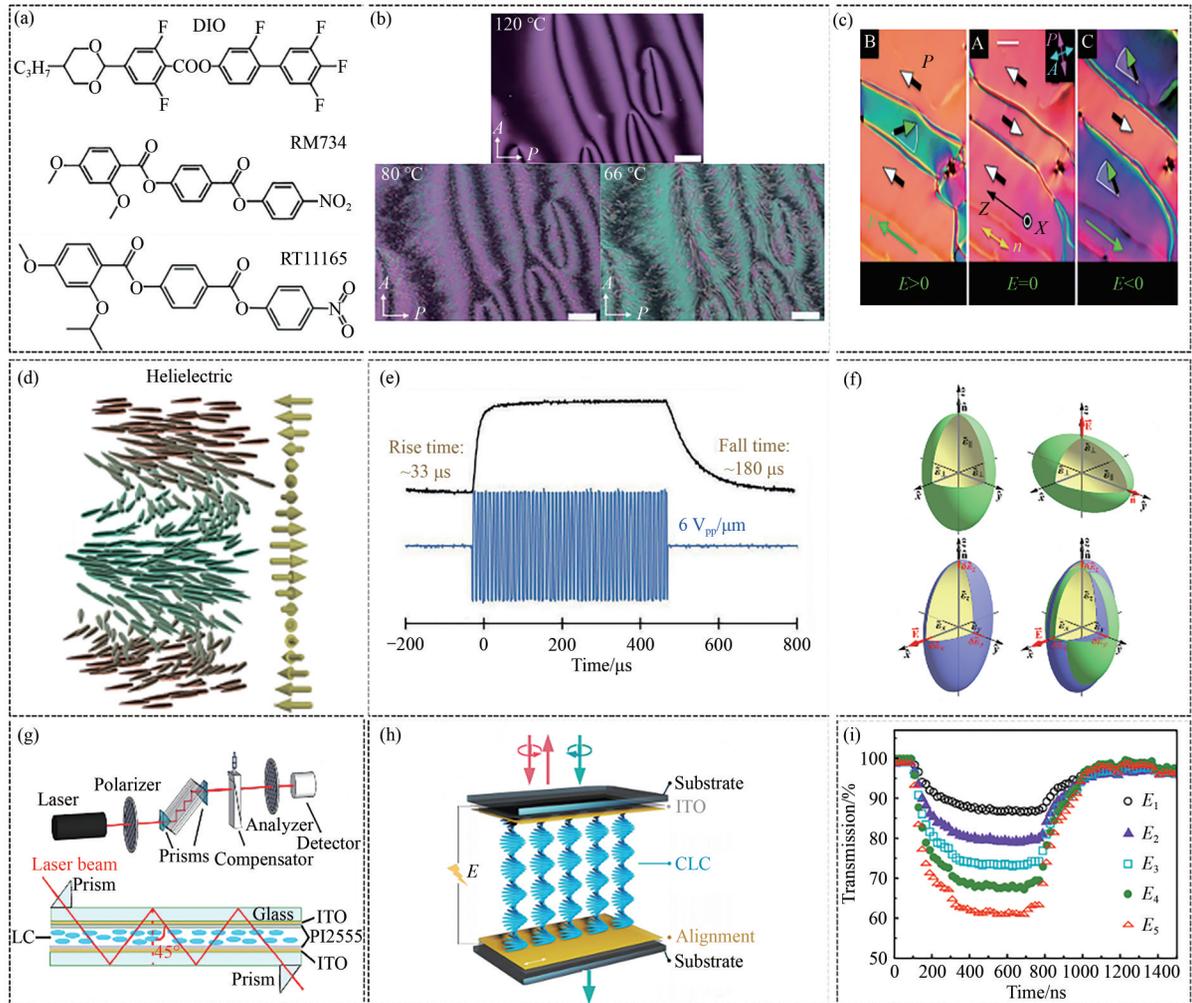


图 5 (a) DIO、RM734、RT11165 的分子结构示意图^[40-41,44]；(b) DIO 的偏光显微照片^[40]；(c) RM734 中具有相反极性取向的铁电畴中的 Frederiks 扭转转变^[42]；(d) 螺旋铁电向列相的结构示意图^[43]；(e) 1 kHz、6 $V_{pp}/\mu\text{m}$ 的矩形场下电光响应的时依赖性^[45]；(f) 光学张量椭球体，上半部分为传统电控效应，下半部分为序参数电控效应^[47]；(g) 实验装置图和光在棱镜与液晶盒中传播示意图，液晶指向矢在传播面内且与基底平行^[48]；(h) 一维螺旋结构示意图^[49]；(i) 不同电场下 CLC 透射光强度的电光响应。 $E_1=62 \text{ V}/\mu\text{m}$ ， $E_2=84 \text{ V}/\mu\text{m}$ ， $E_3=107 \text{ V}/\mu\text{m}$ ， $E_4=128 \text{ V}/\mu\text{m}$ ， $E_5=142 \text{ V}/\mu\text{m}$ 。

Fig. 5 (a) Schematic structures of DIO, RM734, RT11165^[40-41,44]；(b) Polarized light micrograph of DIO^[40]；(c) Frederiks torsional transition in ferroelectric domains with opposite polarity orientations in RM734^[42]；(d) Schematic structure of the helical ferroelectric nematic phase^[43]；(e) Time dependence of electro-optic response under 1 kHz, 6 $V_{pp}/\mu\text{m}$ rectangular field^[45]；(f) Ellipsoid of optical tensor. Top is the traditional electric modulation effect, bottom is the EMOP effect^[47]；(g) Experimental setup and the schematic of light propagation through the prisms and the cell, the LC director is in the incident plane and parallel to the substrates^[48]；(h) Schematic of the 1D helical structure^[49]；(i) Electro-optic responses of the CLC transmitted light intensity under different electric fields. $E_1=62 \text{ V}/\mu\text{m}$ ， $E_2=84 \text{ V}/\mu\text{m}$ ， $E_3=107 \text{ V}/\mu\text{m}$ ， $E_4=128 \text{ V}/\mu\text{m}$ ， $E_5=142 \text{ V}/\mu\text{m}$ 。

度区间降低到了 63°C 至室温范围内。当温度低于 45°C 时，旋转黏度急剧增加，表明发生了玻璃化转变。美国肯特州立大学的 Perera 等人^[45]展示了第一个聚合物稳定的手性铁电向列相液晶透镜，与传统的液晶透镜相比，聚合物稳定的手性铁电

向列相液晶透镜是光学各向同性的，其性能不依赖于入射偏振。他们制备了厚度 $d=10 \mu\text{m}$ 的聚合物稳定手性铁电液晶薄膜，在 1 kHz 、 $6 \text{ V}_{pp}/\mu\text{m}$ 的方波驱动下，其上升时间为 $33 \mu\text{s}$ ，如图 5(e) 所示。只有铁电近晶相和铁电向列相才能表现出

如此快速的切换。

铁电向列相液晶提供了广泛的物理效应可供探索,从拓扑缺陷的行为到表面锚定、对电磁场和流动场的响应、束缚电荷和自由电荷的相互作用、场控流体动力学、场序耦合以及极性和手性的相互作用等。涉及铁电向列相液晶的混合材料,如聚合物稳定、聚合物分散和液晶弹性体等,也将是人们研究的重点。铁电向列相液晶将是未来最有希望和最有应用价值的新型液晶材料之一。

3.3 序参数电控效应

取向有序性是棒状液晶最重要的特征,其导致了液晶具有各向异性的物理性质,也就是在不同的方向上对外场(电场、磁场)有不同的反应。为了定量描述取向有序性,引入了序参数(order parameter)^[26]如式(13)所示:

$$S = \left\langle \frac{1}{2} (3\cos^2\theta - 1) \right\rangle, \quad (13)$$

其中, θ 为液晶分子的极角。在各向同性相中,分子无规则地随机排布,故 $S=0$;在高度有序的晶体结构中,分子均匀地朝着同一个方向排列,此时 $S=1$;而液晶作为介于各向同性相和晶体之间的一种相态,其 S 的取值在 $0\sim 1$ 之间。传统的液晶分子的电光效应是利用了Frederiks效应,即由于液晶分子存在的介电各向异性导致指向矢在低频外电场作用下重新排列。虽然可以通过施加非常强的外电场使得指向矢在 100 ns 之内发生重排^[46],但当撤去外电场后,液晶指向矢恢复到初始状态的速度却较慢(几毫秒)。虽然这种响应速度在显示器的应用中是可以接受的,但是限制了其在其他需要快速响应领域中的应用。

美国肯特州立大学的Borshch等人提出了一种场致序参数调控效应(electric modification of order parameters, EMOP)^[47]。EMOP效应是通过施加一个与液晶指向矢垂直的外电场来抑制指向矢的扰动,从而增大液晶分子整体的有序参数 S ,而不是使液晶分子指向矢重排,如图5(f)所示。施加电场后,会产生3种效应:增强单轴性、诱导双轴性和抑制扰动性。EMOP效应与Frederiks效应相比,最重要的优势就是具有等值的超快开关时间($\sim 30\text{ ns}$)。但其明显的不足就是场致诱导双折射变化仅为 0.001 ,产生的相位延迟太小。理论上,增加盒厚可以增大相位延迟,但盒厚的增加又会使驱动电压进一步提高。为了增加相位延迟量,美国肯特州立大学的Li等人^[48]设计了一种负介电各向异性的全反射液晶盒,并使入射光与液晶盒夹角呈 45° ,实现了光在盒内的多次反射,如图5(g)所示。通过将光在盒内反射15次,能够获得较大的相位延迟($1\ \mu\text{m}$)。但由于增加了电极面积,响应时间有所减慢,但依然在几十纳秒级别。该方法主要的不足就是需要几百伏的驱动电压。随后南京大学的Ma等人^[49]将EMOP效应应用于胆甾相液晶,获得了纳秒级别的响应时间,如图5(h)所示,这比传统的胆甾相液晶电光响应快了4个量级。通过场致诱导双折射的变化使禁带发生移动,实现了光的反射率和透射率在百纳秒级别的变化,但驱动电压仍然高达几百伏,如图5(i)所示。胆甾相的快速响应是基于具有圆偏振选择性的光子带隙的移动,使其性能超越传统的光学相位延迟调制。表2展示了不同类型液晶材料的电响应特性及特点。

表2 各类液晶材料的电响应性能及特点

Tab. 2 Electrical response properties and characteristics of various liquid crystal materials

| 液晶材料 | 工作电压/V | 响应时间/ μs | 特点 |
|--------|-----------|---------------------|---|
| BPLC | 100~200 | <1 000 | 高驱动电压,大温宽,有迟滞现象 |
| SSFLC | <20 | <200 | $d \ll P_0$,具有双稳态、取向困难、抗振能力差、不能实现连续灰度 |
| DHFLC | <10 | <300 | $d \gg P_0, E < E_V$,无迟滞,响应时间不随电压变化,频率越大,响应越快 |
| ESHFLC | <10 | <100 | $d \gg P_0, E > E_V$,无迟滞,高对比度,响应时间不随频率变化,电压越大则响应越快 |
| EMOP | $\gg 100$ | <1 | 驱动电压高达几百伏,百纳秒响应 |

4 总结与展望

随着液晶理论研究的不断深入和液晶加工

技术的持续发展,具有亚毫秒及亚微秒电响应的液晶新相态和新效应层出不穷。蓝相液晶作为一种软物质和三维自组装光子晶体,其光学禁带

恰好位于可见光波段内,且对电场具有良好的快速响应特性。虽然蓝相液晶和聚合物稳定蓝相液晶还存在一定局限,但其独特的光学性能以及亚毫秒级的响应速度等优点,仍然是其在显示以及非显示领域获得广泛应用的强大动力,这种动力也将极大促进蓝相液晶的蓬勃发展。铁电液晶因其固有的自发极性,通过表面锚定能和电场共同作用产生3种电光模式:SSFLC、DHFLC、

ESHFLC,利用光取向的优势使得FLC具有均匀的取向和高对比度。具有高分辨率和高对比度的快速FLC可用于下一代显示器,包括场序彩色FLC微显示器以及2D/3D可切换电视。具有快速电响应特性的液晶材料有望推动液晶微纳光学的发展与潜在应用的挖掘,在光场调控、成像、信息处理、传感、光通信等方面中发挥重要作用。

参 考 文 献:

- [1] 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*, 2022, 98(9): 493-516.
- [2] SCHADT M. Liquid crystal materials and liquid crystal displays [J]. *Annual review of materials science*, 1997, 27(1): 305-379.
- [3] SCHADT M, HELFRICH W. Voltage-dependent optical activity of a twisted nematic liquid crystal [J]. *Applied Physics Letters*, 1971, 18(4): 127-128.
- [4] OHMURO K. Development of super-high-image-quality vertical-alignment-mode LCDs [J]. *SID'97 Digest*, 1997: 845-848.
- [5] TAKEDA A, KATAOKA S, SASAKI T, *et al.* A super-high image quality multi-domain vertical alignment LCD by new rubbing-less technology [J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 1998, 29(1): 1077-1080.
- [6] KWAG J O, SHIN K C, KIM J S, *et al.* Implementation of a new wide viewing angle mode for TFT-LCDs [J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2000, 31(1): 256-259.
- [7] LAZAREV G, CHEN P J, STRAUSS J, *et al.* Beyond the display: phase-only liquid crystal on silicon devices and their applications in photonics [Invited] [J]. *Optics Express*, 2019, 27(11): 16206-16249.
- [8] 杨海宁,李昆,初大平. 硅基液晶技术与可重构全光通信网络[J]. *液晶与显示*, 2021, 36(6): 772-788.
YANG H N, LI K, CHU D P. Liquid crystal on silicon technology and reconfigurable all-optical networks [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2021, 36(6): 772-788.
- [9] NIE X Y, LU R B, XIANYU H Q, *et al.* Anchoring energy and cell gap effects on liquid crystal response time [J]. *Journal of Applied Physics*, 2007, 101(10): 103110.
- [10] WU S T, WU C S. Small angle relaxation of highly deformed nematic liquid crystals [J]. *Applied Physics Letters*, 1988, 53(19): 1794-1796.
- [11] REINITZER F. Beiträge zur kenntniss des cholesterins [J]. *Monatshefte für Chemie und verwandte Teile anderer Wissenschaften*, 1888, 9(1): 421-441.
- [12] HSU C C, HU S S, CHEN T J, *et al.* The essentials of the Kerr effect for polymer-stabilized blue phase liquid crystal [J]. *Optics Communications*, 2014, 322: 78-81.
- [13] GERBER P R. Electro-optical effects of a small-pitch blue-phase system [J]. *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, 1985, 116(3/4): 197-206.
- [14] GLEESON H F, COLES H J. Dynamic properties of blue-phase mixtures [J]. *Liquid Crystals*, 1989, 5(3): 917-926.
- [15] 王萌,宋贺,李烨文. 三维自组装蓝相液晶光子晶体[J]. *化学进展*, 2022, 34(8): 1734-1747.
WANG M, SONG H, LI Y W. Three dimensional self-assembled blue phase liquid crystalline photonic crystal [J]. *Progress in Chemistry*, 2022, 34(8): 1734-1747. (in Chinese)
- [16] YAN J, JIAO M Z, RAO L H, *et al.* Direct measurement of electric-field-induced birefringence in a polymer-stabilized blue-phase liquid crystal composite [J]. *Optics Express*, 2010, 18(11): 11450-11455.
- [17] 李江伟,别国军,高媛媛,等. 聚合物稳定蓝相液晶用单体研究进展[J]. *液晶与显示*, 2016, 31(3): 249-257.

- LI J W, BIE G J, GAO A A, *et al.* Advances on monomers used in polymer stabilized blue phase liquid crystal [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2016, 31(3): 249-257. (in Chinese)
- [18] YAN J, CHENG H C, GAUZA S, *et al.* Extended Kerr effect of polymer-stabilized blue-phase liquid crystals [J]. *Applied Physics Letters*, 2010, 96(7): 071105.
- [19] YAN J, WU S T. Polymer-stabilized blue phase liquid crystals: a tutorial [J]. *Optical Materials Express*, 2011, 1(8): 1527-1535.
- [20] YAN J, WU S T. Effect of polymer concentration and composition on blue phase liquid crystals [J]. *Journal of Display Technology*, 2011, 7(9): 490-493.
- [21] RAO L H, YAN J, WU S T, *et al.* A large Kerr constant polymer-stabilized blue phase liquid crystal [J]. *Applied Physics Letters*, 2011, 98(8): 081109.
- [22] ZHAO Y L, LU W X, YIN S W, *et al.* Polymer-stabilized blue phase liquid crystal devices with ultra-low hysteresis and driving stability [J]. *Journal of Molecular Liquids*, 2024, 396: 123963.
- [23] MEYER R B, LIEBERT L, STRZELECKI L, *et al.* Ferroelectric liquid crystals [J]. *Journal de Physique Lettres*, 1975, 36(3): 69-71.
- [24] PIERANSKI P, GUYON E, KELLER P. Shear flow induced polarization in ferroelectric smectics C [J]. *Journal de Physique*, 1975, 36(10): 1005-1010.
- [25] MEYER R B. Ferroelectric liquid crystals; a review [J]. *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, 1977, 40(1): 33-48.
- [26] YANG D K, WU S T. *Fundamentals of Liquid Crystal Devices* [M]. Hoboken: John Wiley & Sons, 2014.
- [27] 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.
- [28] CLARK N A, LAGERWALL S T. Submicrosecond bistable electro-optic switching in liquid crystals [J]. *Applied Physics Letters*, 1980, 36(11): 899-901.
- [29] 罗丹. 液晶光子学[M]. 北京:电子工业出版社,2018:149-156.
LUO D. *Liquid Crystal Photonics* [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2018: 149-156. (in Chinese)
- [30] GAŁADYK K, PIECEK W, CZERWIŃSKI M, *et al.* An effect of chiral dopants on mesomorphic and electro-optical properties of ferroelectric smectic mixture [J]. *Liquid Crystals*, 2019, 46(15): 2134-2148.
- [31] YOSHINO K, BALAKRISHNAN K G, UEMOTO T, *et al.* Electro-optical effect in ferroelectric smectic liquid crystal [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 1978, 17(3): 597-598.
- [32] 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 crystals [J]. *Liquid Crystals*, 1989, 5(4): 1171-1177.
- [33] GUO Q, YAN K X, CHIGRINOV V, *et al.* Ferroelectric liquid crystals: physics and applications [J]. *Crystals*, 2019, 9(9): 470.
- [34] MA Y, SHI L Y, SRIVASTAVA A K, *et al.* Restricted polymer-stabilised electrically suppressed helix ferroelectric liquid crystals [J]. *Liquid Crystals*, 2016, 43(8): 1092-1099.
- [35] SUN Z B, YUAN Z N, SWAMINATHAN V, *et al.* Reconfigurable geometrical phase spatial light modulator using short-pitch ferroelectric liquid crystals [J]. *Advanced Optical Materials*, 2023, 11(19): 2300561.
- [36] 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]. 31st International Display Research Conference 2011. Arcachon: SID, 2011.
- [37] BORN M. Ueberanisotrope Flüssigkeiten: Versucheiner Theorie der flüssigen Kristalle und des elektrischen Kerr-Effekts in Flüssigkeiten [J]. *Sitzungsber Preuss Akad Wiss*, 1916, 30: 614.
- [38] TAKEZOE H, WATANABE J. Ferroelectricity in liquid crystals [J]. *Molecular Crystals and Liquid Crystals Science and Technology*. Section A. Molecular Crystals and Liquid Crystals, 1999, 328(1): 325-332.
- [39] TAKAE K, TANAKA H. Self-organization into ferroelectric and antiferroelectric crystals via the interplay between particle shape and dipolar interaction [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of*

- America*, 2018, 115(40): 9917-9922.
- [40] NISHIKAWA H, SHIROSHITA K, HIGUCHI H, *et al.* A fluid liquid-crystal material with highly polar order [J]. *Advanced Materials*, 2017, 29(43): 1702354.
- [41] MANDLE R J, COWLING S J, GOODBY J W. A nematic to nematic transformation exhibited by a rod-like liquid crystal [J]. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 2017, 19(18): 11429-11435.
- [42] CHEN X, KORBLOVA E, DONG D P, *et al.* First-principles experimental demonstration of ferroelectricity in a thermotropic nematic liquid crystal: Polar domains and striking electro-optics [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2020, 117(25): 14021-14031.
- [43] ZHAO X H, ZHOU J C, LI J X, *et al.* Spontaneous helielectric nematic liquid crystals: Electric analog to helimagnets [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2021, 118(42): e2111101118.
- [44] ADAKA A, GURAGAIN P, PERERA K, *et al.* A ferroelectric nematic liquid crystal vitrified at room temperature [J]. *Liquid Crystals*, 2024: 1-9.
- [45] PERERA K, HAPUTHANTRIGE N, HIMEL M S H, *et al.* Electrically tunable polymer stabilized chiral ferroelectric nematic liquid crystal microlenses [J]. *Advanced Optical Materials*, 2024, 12(7): 2302500.
- [46] MACLENNAN H T E, CLARK N A. Sub 100 nanosecond pretilted planar-to-homeotropic reorientation of nematic liquid crystals under high electric field [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 1998, 37(5R): 2587.
- [47] BORSHCH V, SHIYANOVSKII S V, LAVRETOVICH O D. Nanosecond electro-optic switching of a liquid crystal [J]. *Physical Review Letters*, 2013, 111(10): 107802.
- [48] LI B X, SHIYANOVSKII S V, LAVRETOVICH O D. Nanosecond switching of micrometer optical retardance by an electrically controlled nematic liquid crystal cell [J]. *Optics Express*, 2016, 24(26): 29477-29482.
- [49] MA L L, LI C Y, SUN L Y, *et al.* Submicrosecond electro-optical switching of one-dimensional soft photonic crystals [J]. *Photonics Research*, 2022, 10(3): 786-792.

作者简介:



李晓波,男,硕士研究生,2017年于华东理工大学获得学士学位,主要从事铁电液晶材料相关方面的研究。E-mail: 522023340042@smail.nju.edu.cn



胡伟,男,博士,教授,2009年于吉林大学获得博士学位,主要从事液晶光子学研究,聚焦光控液晶层级序构、光寻址液晶调光、军民用液晶元件开发三方面。E-mail: huwei@nju.edu.cn