

基于序参数与取向涨落的液晶电光开关

孙路瑶¹, 王鑫垚¹, 陈佳浩¹, 李超逸², 马玲玲^{2*}, 李炳祥^{1,2**}, 陆延青²¹南京邮电大学电子与光学工程学院、柔性电子(未来技术)学院, 江苏 南京 210023;²南京大学现代工程与应用科学学院, 江苏 南京 210023

摘要 向列相液晶因其独特的光学和电学各向异性, 广泛应用于光电显示等领域。光通信技术的持续发展, 需要液晶材料具有更快的电光响应。通过对 6 种负性向列相液晶施加垂直于分子平均取向的电场, 结合特殊入射方式, 系统地研究了电场对液晶取向涨落和单轴序参数的调控。实验结果表明: 电光响应的开关时间均小于 350 ns; 液晶的介电各向异性越大, 场致双折射率变化越大, 其最大值与所施加的电场大小和向列相液晶的介电各向异性均呈线性关系。

关键词 光学器件; 向列相液晶; 介电各向异性; 双折射率; 序参数; 取向涨落; 电光开关

中图分类号 O438

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.2123001

Liquid Crystal Electro-Optic Switching Based on Order Parameter and Orientation FluctuationsSun Luyao¹, Wang Xinyao¹, Chen Jiahao¹, Li Chaoyi², Ma Lingling^{2*}, Li Bingxiang^{1,2**},
Lu Yanqing²¹College of Electronic and Optical Engineering & College of Flexible Electronics (Future Technology), Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, Jiangsu, China;²College of Engineering and Applied Sciences, Nanjing University, Nanjing 210023, Jiangsu, China

Abstract Nematic liquid crystals (NLCs) have been widely used in the display industry and other electrooptical fields due to their unique optical and electrical anisotropies. The continuous development of optical communication requires faster electro-optic responses of liquid crystal materials. Here, we systematically explore the electrical modification of the orientation fluctuations and the uniaxial order parameter in six negative NLCs by applying electric fields perpendicular to the average molecular orientation and using a special incidence of light. Experimental results show that the switching-on time and switching-off time of the electro-optic responses are smaller than 350 ns. The field-induced birefringence change rate of NLCs grows as the dielectric anisotropy increases. The maximum field-induced birefringence change rate is proportional to both the applied electric field and the nematic dielectric anisotropy.

Key words optical devices; nematic liquid crystal; dielectric anisotropy; birefringence; order parameter; orientation fluctuations; electro-optic switching

1 引言

向列相液晶具有丰富的物理各向异性, 是基础研究的好材料, 作为光电显示的常用媒质^[1-4], 为显示行业带来数千亿美元的年产值。向列相液晶已被广泛应用于电光领域, 如光束控制器^[5]、光电功能装置^[6]、分离器^[7]、调制器^[8-9]、激光器^[10-11]等。液晶分子长轴沿某一方向的平均取向通常被称为液晶的指向矢 \hat{n} , 同

也是液晶的光轴。在显示、光快门、调制器等应用中, 理想的操作模式是在短时间内进行较大切换。向列相液晶的传统电光应用一般基于 Fredericksz 转变效应^[2], 即施加大于阈值的电场会重新改变指向矢取向。该效应可以通过提高电场的数量级实现更快的开启过程^[12]。关闭电场后, 由于液晶自身的黏滞阻力, 液晶分子集体返回到初始取向的过程相对较慢, 响应时间为毫秒量级。无疑地, 缓慢的响应限制了向列相液

收稿日期: 2022-04-18; 修回日期: 2022-05-06; 录用日期: 2022-05-12

基金项目: 国家重点研发计划青年科学家项目(2021YFA1202000)、国家自然科学基金(RK106LH21001, 52003115)、江苏省自然科学基金(BK20212004, BK20200320)

通信作者: *malingling@nju.edu.cn; **bxli@njupt.edu.cn

晶的进一步发展和应用。对此,科学家们提出了许多将向列相液晶的电光响应时间缩短到亚毫秒范围的方法,如:在双向场切换模式下,电光响应时间为亚毫秒量级^[13];引入活性单体形成聚合物稳定液晶^[14-17],其指向矢可以在 0.1 ms 内重定向;在具有高预倾角的特殊几何结构中使用双向场向列相液晶,其响应时间可减少到 0.1 ms^[18]。然而,对于大部分基于向列相液晶的电光器件,其电光响应时间很少达到 100 μ s 以下。

为了更高效地缩短响应时间,Borshch 等^[19]对负性向列相液晶施加一个垂直于液晶指向矢的电场,通过改变液晶分子的序参数实现纳秒级快速响应。通常在该电场驱动模式下,微观分子层面会产生三种效应:诱导产生双轴序(约 2 ns)、增强单轴序(约 30 ns)和抑制取向涨落(小于毫秒量级)。由于液晶指向矢的方向并未发生大幅度偏转,因此电光响应时间大幅缩减。进一步研究表明,通过巧妙设计光路,特别是光的入射方式,可以消除取向涨落对电光响应的影响,而场致双轴序与场增强单轴序引起的电光响应非常快,达到了纳秒级别,因此该效应被称为纳秒电控序参数效应(即 NEMOP 效应)^[19-22]。在同样的电场条件下,向列相液晶的负性介电各向异性越大,其双折射率越大,对应产生的 NEMOP 效应越强^[21]。同时,Li 等^[23]利用光在向列相液晶盒中的多次全内反射增大光程,其 NEMOP 效应实现了 1 μ m 的光程差,使得 μ m 级光延迟可以在 10~100 ns 内快速切换。然而,利用单轴序和取向涨落的调控实现向列相液晶的纳秒级电光响应,及其与外界电场和材料自身性质之间相应的关系仍有待进一步的研究。

本文选用 6 种介电各向异性不同的负性向列相液晶,采用可以消除双轴序变化对系统透射率贡献的入射光路(简称消双轴入射光路),实验研究液晶单轴序参数增大和取向涨落的抑制对向列相液晶电光响应的影响。同时,还进一步研究场致双折射率变化分别与液晶材料

的介电各向异性和外加电场的大小之间的关系。

2 实验材料及方法

实验使用一系列具有不同负介电各向异性 $\Delta\epsilon$ 和双折射率 Δn 的向列相液晶:HNG7156($\Delta\epsilon = -12.2$, $\Delta n = 0.15$)、HNG7058($\Delta\epsilon = -9.2$, $\Delta n = 0.08$) (分别简称为 N1、N2,江苏和成显示科技有限公司);MLC2080($\Delta\epsilon = -6.4$, $\Delta n = 0.11$)、MJ961200($\Delta\epsilon = -5.6$, $\Delta n = 0.11$)、MJ951152($\Delta\epsilon = -4.2$, $\Delta n = 0.15$)、MAT03382($\Delta\epsilon = -3.8$, $\Delta n = 0.11$) (分别简称为 N3、N4、N5 和 N6,德国默克公司)^[21]。如图 1(a)所示,实验中使用的液晶盒由两个具有氧化铟锡(ITO,低电阻率)透明电极的玻璃板组成。将聚酰亚胺 PI-2555(HD MicroSystems)涂在两个板的内表面上,然后单向摩擦以提供向列相液晶的平行取向。液晶盒厚度 d 为 4.5~5.1 μ m。外加电场会引起有效双折射率的变化: $\delta n_{\text{eff}} = \sigma_{\text{bu}}(\delta\tilde{\epsilon}_u + 3\delta\tilde{\epsilon}_b/2) + \sigma_{\text{uf}}(\delta\tilde{\epsilon}_u + 3\delta\tilde{\epsilon}_f/2)$ ^[19],其中 σ_{bu} 、 σ_{uf} 是权重系数, $\delta\tilde{\epsilon}_u$ 、 $\delta\tilde{\epsilon}_b$ 、 $\delta\tilde{\epsilon}_f$ 分别表示单轴序参数的增大、双轴序参数的产生和取向涨落的抑制对电光响应的影响。为消除场致双轴序对向列相液晶电光响应的影响,如图 1(b)所示,采用了消双轴入射光路。He-Ne 激光器发出的波长 $\lambda = 632.8$ nm 的光束依次通过液晶盒、Soleil-Babinet 可调相位补偿器和两个交叉偏振器。液晶盒夹在两个直角棱镜之间,从而使线偏振激光束以 45° 角进入液晶,且液晶指向矢 \hat{n} 与液晶盒的入射平面相互垂直。在消双轴入射光路中, $\sigma_{\text{bu}} = 0$,因此只有单轴序参数变化和取向涨落抑制作用于电光响应。透射光强由光电探测器 DET025AL/M(THORLABS,响应时间小于 1 ns)测量。使用特征时间为 1 ns 的脉冲发生器 HV 1000 提供持续时间为 380 ns 的直流电压脉冲。最后,电压脉冲和光电探测器信号通过采样率为 1 GSa/s 的数字示波器 DS1202(RIGOL)来收集。

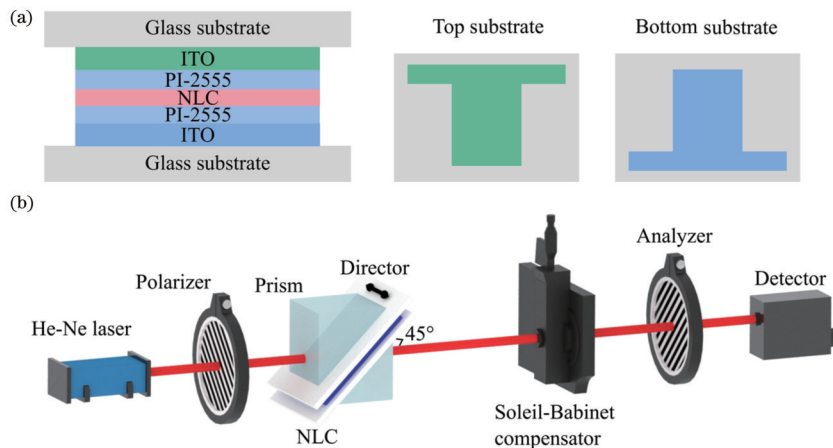


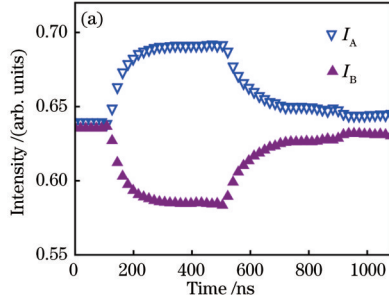
图 1 实验装置。(a)液晶盒结构的侧视图和俯视图;(b)实验光路

Fig. 1 Experimental setup. (a) Side view and top view of liquid crystal cell structure; (b) experimental light path

场致双折射率的变化量 δn 可以表示为

$$\delta n = \frac{\lambda}{\pi \sqrt{2} d} \left\{ -\frac{1}{2} \arccos[1 - I_A(t) - I_A(0) - I_B(t) + I_B(0)] - \arccos[1 - 2I_A(t)] \right\}, \quad (1)$$

式中: $I_A(0)$ 和 $I_B(0)$ 为初始无场状态下透射光的强度,



$I_A(t)$ 和 $I_B(t)$ 为动态光强, 满足 $\Delta I_A = I_A(t) - I_A(0)$, $\Delta I_B = I_B(t) - I_B(0)$ 。图 2 为消双轴入射光路下施加的电场引起透射光强与液晶 N2 双折射率的变化。为了消除光的散射等寄生效应对透射光强变化的影响, 分别在两个补偿相位 ϕ_A 、 ϕ_B 下测量动态光强 $I_A(t)$ 和 $I_B(t)$ 。两个补偿相位满足 $\phi_A \neq \phi_B$ 且 $|\phi_A - \phi_B| = \pi/2$ 。

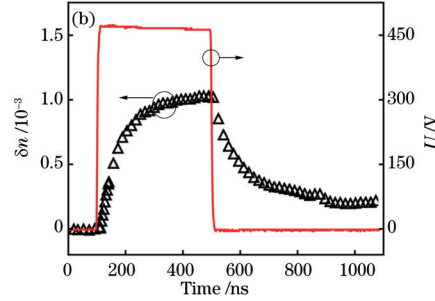


图 2 消双轴入射光路下, 施加的电场引起透射光强与液晶 N2 双折射率的变化 (工作温度为 23 °C, 电压 $U_0 = 478$ V, 盒厚 $d = 4.6 \mu\text{m}$)。(a) 纳秒电压脉冲对透射光强的动态作用; (b) 场致双折射率 δn 随所加电压 U 的动态变化

Fig. 2 Field-induced change of transmitted light intensity and birefringence change of nematic N2 where biaxial contribution is excluded (working temperature is 23 °C, amplitude of voltage pulse is $U_0 = 478$ V, and cell thickness is $d = 4.6 \mu\text{m}$). (a) Dynamics effect of nanosecond voltage pulse on transmitted light intensity; (b) dynamic change of field-induced birefringence δn in response to applied voltage U

3 实验结果

本实验选用 6 种具有不同介电各向异性的负性向列相液晶 N1、N2、N3、N4、N5、N6, 探究了场致双折射率在电场作用下的变化 δn 。从图 3 可以看出, 电场 $E = 1.7 \times 10^8$ V/m 时, 6 种液晶材料对应的 δn 约为 2.2×10^{-3} 、 1.9×10^{-3} 、 1.5×10^{-3} 、 1.3×10^{-3} 、 1.1×10^{-3} 、 1.0×10^{-3} , 即负介电各向异性 $\Delta\epsilon$ 越大, 场致双折射率变化 δn 也越大。在 6 种向列相液晶中, N1 的介电各向异性最大, 相同条件下其场致双折射率的变化 δn 也是最大的。N6 ($\Delta\epsilon = -3.8$) 和 N1

($\Delta\epsilon = -12.2$) 相比, 介电各向异性 $\Delta\epsilon$ 增大了 69%, 场致双折射率变化 δn 增加了约 53%。可以看出, 介电各向异性 $\Delta\epsilon$ 越小, 加电场过程的响应时间越长。

场致双折射率变化除了与介电各向异性大小有关, 还与施加的电场大小有关。为了研究外加电场对场致双折射率变化的情况, 以 N1 为例, 对其分别施加强度为 0.38×10^8 V/m、 0.75×10^8 V/m、 1.1×10^8 V/m、 1.4×10^8 V/m、 1.7×10^8 V/m 的电场, 结果如图 4 所示。随着施加的电场的增大, δn 也随之增大。当电场 $E = 1.7 \times 10^8$ V/m, 场致双折射率变化的最大的

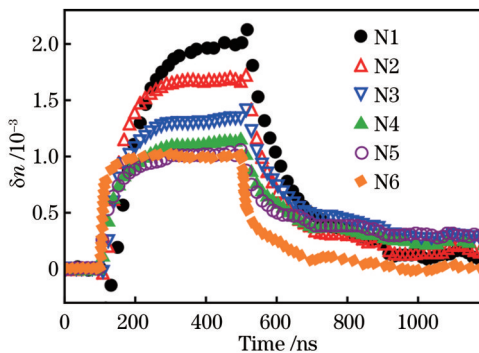


图 3 6 种液晶材料 N1、N2、N3、N4、N5 和 N6 在电场 $E = 1.7 \times 10^8$ V/m 作用下的场致双折射变化率 δn (工作温度为 23 °C)

Fig. 3 Field-induced birefringence change δn of six liquid crystals N1, N2, N3, N4, N5, and N6 with applied electric field $E = 1.7 \times 10^8$ V/m (working temperature is 23 °C)

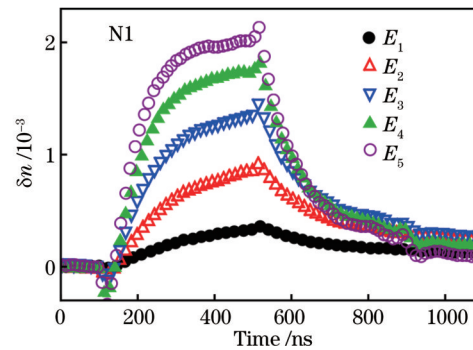


图 4 电场 $E_1 = 0.38 \times 10^8$ V/m、 $E_2 = 0.75 \times 10^8$ V/m、 $E_3 = 1.1 \times 10^8$ V/m、 $E_4 = 1.4 \times 10^8$ V/m、 $E_5 = 1.7 \times 10^8$ V/m 条件下液晶材料 N1 的场致双折射率的变化 δn (工作温度为 23 °C, 盒厚 $d = 5.1 \mu\text{m}$)

Fig. 4 Field-induced birefringence change δn of N1 with electric field $E_1 = 0.38 \times 10^8$ V/m, $E_2 = 0.75 \times 10^8$ V/m, $E_3 = 1.1 \times 10^8$ V/m, $E_4 = 1.4 \times 10^8$ V/m, and $E_5 = 1.7 \times 10^8$ V/m, respectively (working temperature is 23 °C, and cell thickness is $d = 5.1 \mu\text{m}$)

值 δn_{\max} 达到 2.2×10^{-3} 。

为了进一步研究场致双折射率变化的最大值 δn_{\max} 分别与电场和介电各向异性 $\Delta\epsilon$ 的函数关系,将得到的实验数据进行理论分析和拟合。如图 5(a)和(b)所示, δn_{\max} 与电场大小呈线性关系, $\delta n_{\max} = \beta E$, 且液晶

的介电各向异性 $\Delta\epsilon$ 越大,系数 β 也越大。随机选取三个电场大小 ($1.7 \times 10^8 \text{ V/m}$, $1.4 \times 10^8 \text{ V/m}$, $1.0 \times 10^8 \text{ V/m}$) 进行拟合,拟合结果表明场致双折射率变化的最大值 δn_{\max} 与介电各向异性 $\Delta\epsilon$ 呈线性关系,如图 5(c)所示。图 5 中虚线为拟合线。

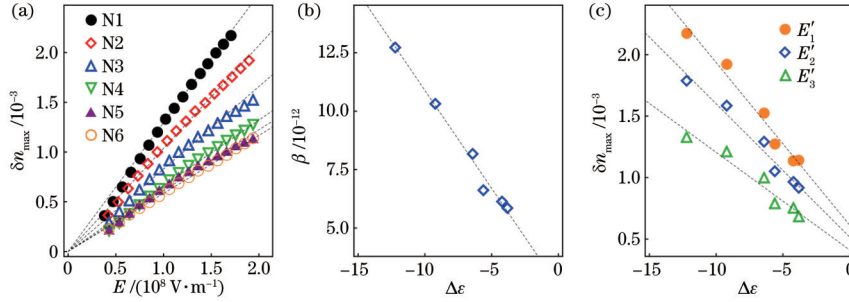


图 5 场致双折射率变化与外加电场大小、材料介电各向异性大小的关系(工作温度为 $23 \text{ }^\circ\text{C}$)。(a)不同向列相液晶的 δn_{\max} 与电场的关系;(b) β 对 $\Delta\epsilon$ 的依赖关系;(c)在电场 $E'_1 = 1.7 \times 10^8 \text{ V/m}$, $E'_2 = 1.4 \times 10^8 \text{ V/m}$, $E'_3 = 1.0 \times 10^8 \text{ V/m}$ 的情况下,场致双折射率变化的最大值 δn_{\max} 与 $\Delta\epsilon$ 的函数关系

Fig. 5 Relationship among field-induced birefringence change, applied electric field, and dielectric anisotropy of material (working temperature is $23 \text{ }^\circ\text{C}$). (a) Relationship between δn_{\max} of different nematic liquid crystals with applied electric field; (b) dependence of β of nematic liquid crystal on dielectric anisotropy $\Delta\epsilon$; (c) δn_{\max} as a function of $\Delta\epsilon$ at $E'_1 = 1.7 \times 10^8 \text{ V/m}$, $E'_2 = 1.4 \times 10^8 \text{ V/m}$, and $E'_3 = 1.0 \times 10^8 \text{ V/m}$

工业上通常用变化量最大值的 10% 和 90% 之间转化的时间来表征响应的快慢。为与产业应用对标,本实验采用这种方法来分析消双轴入射光路中向列相液晶的电光响应时间,即开启时间 τ_{on} 和关闭时间 τ_{off} 分别是 δn 随着电场从场致双折射率变化的最大值 δn_{\max} 与最小值 δn_{\min} 的差值 $\delta n_{\min} - \delta n_{\max}$ 从 10% 变化至

90% 和 $\delta n_{\max} - \delta n_{\min}$ 从 90% 变化至 10% 所需要的时间。如图 6 所示,向列相液晶的开启时间 τ_{on} 和关闭时间 τ_{off} 在 50~350 ns 范围内。可以明显看出,对于介电各向异性 $\Delta\epsilon$ 较小的液晶 N5、N6,其开关响应时间较短,且所有液晶材料的关闭时间 τ_{off} 相对开启时间 τ_{on} 均较长。

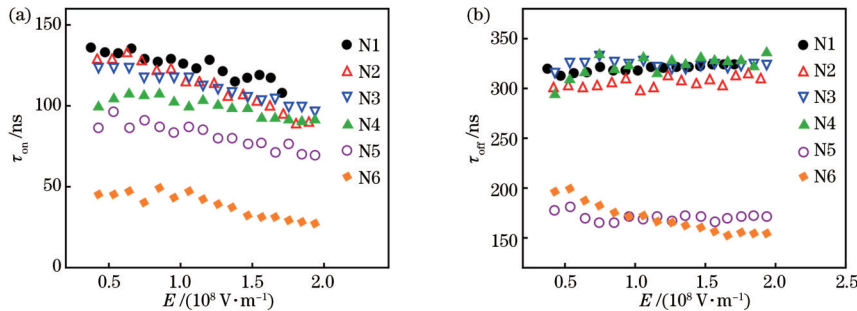


图 6 6 种向列相液晶材料 N1、N2、N3、N4、N5 和 N6 的电光响应的特征时间(工作温度为 $23 \text{ }^\circ\text{C}$)。(a)开启时间 τ_{on} ;(b)关闭时间 τ_{off}

子的光学张量而非指向矢取向。这一过程发生在微观尺度上,因此响应比较快。

电光响应时间缩短至亚微秒量级的基本原理可以从微观角度来解释。如图 7(a)所示,在没有施加电场的情况下,液晶分子呈现出部分取向有序,且存在取向涨落。传统电光响应中的 Freedericksz 转变效应是通过施加电场重新改变指向矢取向。电场关闭后,由于液晶自身的黏滞阻力,液晶分子返回到初始取向的过程相对较慢,响应时间为毫秒量级。如图 7(b)所示,在消双轴入射光路中,施加垂直于指向矢的电场,液晶分子的长轴方向与指向矢方向趋于平行,增大了单轴取向序,同时电场还抑制取向涨落,从而改变了液晶分

子的光学张量而非指向矢取向。这一过程发生在微观尺度上,因此响应比较快。

4 结 论

本文基于液晶序参数与取向涨落的调控,实验证明了 6 种负性向列相液晶的亚微秒电光响应。其中,所施加的电场垂直于负性液晶的指向矢,不改变液晶分子的集体取向,导致液晶分子的双轴序的诱导、单轴序的增大和取向涨落的抑制。为了进一步理解单轴序与取向涨落对电光效应的有效作用,通过巧妙地采用

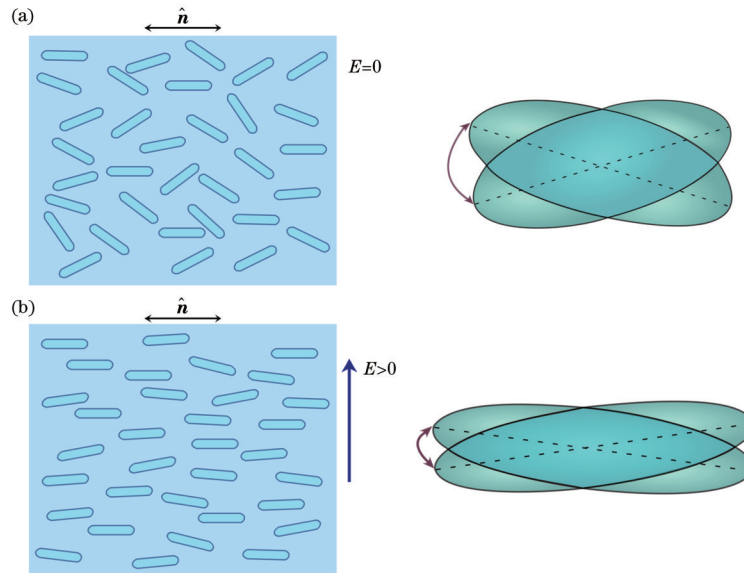


图 7 场诱导效应示意图(棒表示棒状液晶分子,椭圆表示了液晶张量)。(a)无电场时液晶分子部分取向序和取向涨落;(b)施加电场情况下的液晶分子单轴序的增大和取向涨落的抑制

Fig. 7 Schematic illustrations of field-induced effects (rods present rod-like molecules of NLCs, and ellipsoids indicate optical tensors of NLCs). (a) Orientational order of liquid crystal molecules and orientation fluctuation in absence of electric field; (b) orientational order of liquid crystal molecules and quenching of orientation fluctuation under electric field applied

消双轴入射光路,消除了双轴序参数的产生对液晶电光响应的影响。也就是说,电场引起光路透射率的变化是由液晶单轴序和取向涨落的改变引起的。人们通常使用品质因数 $F_{OM} = L^2 \delta n^2 / (\pi^2 \tau_{off})$ 表征液晶中相位的调制性能^[24],其中, L 是光在液晶中传播的路程。实验结果表明,消双轴入射光路引起的双折射率变化 δn 的量级为 1×10^{-3} ,响应时间在 50~350 ns 的范围内,品质因数约为 $25 \sim 60 \mu\text{m}^2/\text{s}$,比传统 Freedericksz 效应 (F_{OM} 为 $1 \sim 10 \mu\text{m}^2/\text{s}$ ^[25]) 提高了 2~6 倍。另外,单轴序参数的增大和取向涨落的抑制对电光响应的作用很大程度上取决于介电各向异性 $\Delta\epsilon$ 的大小和施加的电场。随着 $\Delta\epsilon$ 或施加电场的增大,场致双折射率变化 δn 也变大。对场致双折射率变化的最大值 δn_{\max} 、介电各向异性 $\Delta\epsilon$ 、施加的电场大小 E 进行拟合,得到: δn_{\max} 与电场大小呈线性关系, β 也随向列相液晶的介电各向异性的增大而增大。单轴序和取向涨落电场效应丰富了液晶电光调控方式,可进一步应用于如光快门、光束操控器、相位调制器等快速电光设备。

参 考 文 献

- [1] Lu Y Q, Li Y. Planar liquid crystal polarization optics for near-eye displays[J]. Light: Science & Applications, 2021, 10(1): 122.
- [2] Yang D K, Wu S T. Fundamentals of Liquid Crystal Devices[M]. Chichester: John Wiley & Sons, Ltd., 2006.
- [3] Shen Y, Xu Y C, Ge Y H, et al. Photoalignment of dye-doped cholesteric liquid crystals for electrically tunable patterns with fingerprint textures[J]. Optics Express, 2018, 26(2): 1422-1432.
- [4] Lin Y H, Wang Y J, Lin H C, et al. Optical measurement in a curved optical medium with optical birefringence and anisotropic absorption[J]. Optics Express, 2021, 29(23): 38654-38668.
- [5] He Z Q, Yin K, Wu S T. Miniature planar telescopes for efficient, wide-angle, high-precision beam steering[J]. Light: Science & Applications, 2021, 10: 134.
- [6] 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.
- [7] An S N, Shi Y, Yi Z, et al. Ultra-short dual-core GaAs photonic crystal fiber splitter filled with nematic liquid crystal[J]. Optical Engineering, 2021, 60(5): 056104.
- [8] Wei B Y, Zhang Y, Li P, et al. Liquid-crystal splitter for generating and separating autofocusing and autodefocusing circular Airy beams[J]. Optics Express, 2020, 28(18): 26151-26160.
- [9] 丛龙庆. 主动式太赫兹超材料器件综述[J]. 中国激光, 2021, 48(19): 1914003.
Cong L Q. Active terahertz metadivices[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(19): 1914003.
- [10] 刘言军, 蔡文锋, 李焯, 等. 液晶随机激光: 原理与研究进展[J]. 中国激光, 2021, 48(12): 1201006.
Liu Y J, Cai W F, Li Y, et al. Liquid crystal random laser: principles and research progresses[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(12): 1201006.
- [11] 刘晓凤, 彭丽萍, 赵元安, 等. 液晶光学器件的近红外激光损伤研究进展[J]. 中国激光, 2020, 47(1): 0100002.
Liu X F, Peng L P, Zhao Y A, et al. Research progress on near-infrared high-power laser damage of liquid crystal optical devices[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(1): 0100002.
- [12] Takahashi H, MacLennan J 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(5A): 2587-2589.
- [13] Geivandov A R, Barnik M I, Palto V S, et al. Submillisecond electro-optical response of a nematic liquid crystal in the bidirectional field switching mode[J]. *Crystallography Reports*, 2018, 63(6): 971-976.
- [14] Guo S M, Liang X, Zhang H M, et al. An electrically light-transmittance-controllable film with a low-driving voltage from a coexistent system of polymer-dispersed and polymer-stabilised cholesteric liquid crystals[J]. *Liquid Crystals*, 2018, 45(12): 1854-1860.
- [15] Li X, Du X W, Guo P Y, et al. Fast switchable dual-model grating by using polymer-stabilized sphere phase liquid crystal[J]. *Polymers*, 2018, 10(8): 884.
- [16] Zhang L P, Li K X, Hu W, et al. Broadband reflection mechanism of polymer stabilised cholesteric liquid crystal (PChLC) with pitch gradient[J]. *Liquid Crystals*, 2011, 38(6): 673-677.
- [17] Chen J H, Li C Y, Sun L Y, et al. Polymerization enabled reduction of the electrically induced birefringence change in nematic liquid crystals[J]. *Chinese Optics Letters*, 2022, 20(2): 023201.
- [18] Golovin A B, Shiyonovskii S V, Lavrentovich O D. Fast switching dual-frequency liquid crystal optical retarder, driven by an amplitude and frequency modulated voltage [J]. *Applied Physics Letters*, 2003, 83(19): 3864-3866.
- [19] Borshch V, Shiyonovskii S V, Li B X, et al. Nanosecond electro-optics of a nematic liquid crystal with negative dielectric anisotropy[J]. *Physical Review E*, 2014, 90(6): 062504.
- [20] Borshch V, Shiyonovskii S V, Lavrentovich O D. Nanosecond electro-optic switching of a liquid crystal[J]. *Physical Review Letters*, 2013, 111(10): 107802.
- [21] Li B X, Borshch V, Shiyonovskii S V, et al. Electro-optic switching of dielectrically negative nematic through nanosecond electric modification of order parameter[J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 104(20): 201105.
- [22] Li B X, Borshch V, Wang H, et al. Enhanced nanosecond electro-optic effect in isotropic and nematic phases of dielectrically negative nematics doped by strongly polar additive[J]. *Journal of Molecular Liquids*, 2018, 267: 450-455.
- [23] Li B X, Shiyonovskii S V, Lavrentovich O D. Nanosecond switching of micrometer optical retardance by an electrically controlled nematic liquid crystal cell[J]. *Optics Express*, 2016, 24(26): 29477-29482.
- [24] Wu S T, Lackner A M, Efron U. Optimal operation temperature of liquid crystal modulators[J]. *Applied Optics*, 1987, 26(16): 3441-3445.
- [25] Wu S T, Neubert M E, Keast S S, et al. Wide nematic range alkenyl diphenyldiacetylene liquid crystals[J]. *Applied Physics Letters*, 2000, 77(7): 957-959.