

文章编号:1007-2780(2019)09-0849-08

电场频率对可双频驱动蓝相液晶温域及电光性能的影响

李辰悦¹, 王 萌², 张翠红³, 原小涛^{4*}, 张兰英^{5*}

(1. 北京科技大学 材料科学与工程学院, 北京 100083;

2. 中国矿业大学(北京) 机电与信息工程学院, 北京 100083;

3. 西京学院 理学院, 西安 710123; 4. 北京科技大学 化学与生物工程学院, 北京 100083;

5. 北京大学 工学院, 北京 100871)

摘要:为了制备快速响应的蓝相(BP)液晶电光器件,并研究其在不同电场频率下的响应,本文首先合成了双频液晶分子(DFLC),将其加入蓝相母体液晶中,得到了可双频驱动的蓝相液晶(DF-BPLC)材料。利用偏光显微镜(POM)在不同频率的电场下观察其织构及相变行为,通过添加 DFLC,可以调控 BP 温域。在低频电场下,由于电场取向作用及 DFLC 的弯曲结构和挠曲电效应可使得 BP 温域得到拓宽。但在高频电场下,BP 温域有所减小。所制备 DF-BPLC 材料既具有频率响应特性又具有优异的电光性能,在光电器件中有很好的应用前景。

关键词:液晶;蓝相;双频液晶;频率调控

中图分类号:O753⁺.2 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/YJYXS20193409.0849

Influence of electric field frequency on the blue phase temperature range and electro-optical property of dual-frequency-driven blue phase liquid crystal materials

LI Chen-yue¹, WANG Meng², ZHANG Cui-hong³, YUAN Xiao-tao^{4*}, ZHANG Lan-ying^{5*}

(1. College of Material Science and Engineering,

University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;

2. School of Mechanical Electronic & Information Engineering,

China University of Mining & Technology Beijing, Beijing 100083, China;

3. School of Sciences, Xijing University, Xi'an 710123, China;

4. School of Chemistry and Biological Engineering,

University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;

5. College of Engineering, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: In order to obtain fast response electro-optic devices, a dual-frequency-driven blue phase

收稿日期:2019-04-10;**修订日期:**2019-05-06.

基金项目:国家自然科学基金(No.51602007, No.51573003);国家重点研发计划(No.2018YFB0703700)

Supported by National Natural Science Foundation of China(No. 51602007, No.51573003); National Key R&D Program of China(No.2018YFB0703700)

* 通信联系人, E-mail: yuanxt@ustb.edu.cn; zhanglanying@pku.edu.cn

liquid crystal (DF-BPLC) was obtained through preparing dual-frequency liquid crystal molecules and adding into a blue phase host. The texture and phase transition behavior of the DF-BPLC were observed by polarizing microscopy (POM) at different electric field frequencies, and it was found that it could have a great influence on the temperature range of blue phase (BP). Under low frequency electric field, the BP temperature range of DF-BPLC can be broadened under the effects of electric field orientation, bending structure and flexoelectricity of DFLC. The prepared DF-BPLC material exhibits not only frequency responsive characteristic, but also excellent electro-optic property, which may have great application prospects in optoelectronic devices.

Key words: liquid crystal; blue phase; dual frequency liquid crystal; frequency response

1 引言

蓝相(BP)由于其独特的三维自组装结构和优异的电光特性^[1-2]而受到广泛关注,在快速光调制器或可调谐光子晶体领域具有广阔的应用前景^[3-5]。根据其微观结构的不同,BP可分为BP I、BP II和BP III 3种类型。BP I和BP II分别具有体心立方(BCC)结构和简单立方(SC)结构,而BP III是具有局部立方晶格结构的非晶相。在任意电场下,由于立方晶格的变形是围绕光传播方向对称的,因此BP没有相位延迟。BP存在于胆甾相(Ch)和各向同性相(Iso)之间,通常温度范围仅约1℃,这严重限制了蓝相材料的实际应用。目前已经发展了几种方法拓宽蓝相温域,包括用聚合物网络、纳米粒子或设计具有特殊形状(T形、二聚体、弯曲型)的小分子来稳定BP。

双频液晶(DFLC)具有外加电场频率响应的特性,即随着电场频率从低到高,其介电各向异性常数($\Delta\epsilon$)可从正值变为到负值^[6-8]。 $\Delta\epsilon$ 变为零时对应的外电场频率成为临界转换频率(f_c),为DFLC最重要的参数之一。DFLC通过外场频率大小的调节即可实现快速开关态响应,越来越多基于DFLC材料制备的显示器件^[9-11]和光子器件^[12-14]已经被开发出来,如光栅、光调制器、频率驱动显示器^[15-16]等。2011年,Yabu和MOzaki等人发现在DFLC材料中添加手性化合物可制备具有双频驱动性能的蓝相液晶材料,该材料在低电压下通过改变电场频率表现出具有亚微秒级响应速度的电光响应行为^[17]。2013年,Mangelinckx用染料掺杂的双频液晶的宾主效应制备了光开关,响应快且极化不敏感^[18]。2016年,Duan用双频液晶制备了偏振光栅,具有极快的开关切

换时间^[19]。2017年,Wang等人利用光取向的双频驱动液晶制备了可切换的菲涅尔透镜,可在高频和低频下切换,具有高的衍射效率和低的驱动电压^[20]。

与BP在电场作用下的克尔效应相比,这种电场频率诱导产生的晶格形变更大,响应时间更快,在光电子学领域存在巨大的潜在应用。然而,由于现有双频液晶材料的 f_c 较高,高频驱动极易造成大的介电损耗,影响器件的性能,使其实际应用受到限制。目前双频液晶材料应用于蓝相液晶领域的研究较少,蓝相频率调制性能有待进一步探索。

为制备性能优异的可双频驱动蓝相液晶材料(DF-BPLC),本文首先通过分子设计和合成,制备了具有低 f_c 的DFLC化合物,之后将其添加到BP母体液晶中,通过研究添加前后BP温域和电光响应性能,发现DFLC分子的加入显著影响了BP材料的相变温度和电场响应性能。通过对器件结构的控制和施加不同方向的电场,样品的BPI相温域可通过施加适当频率得到拓宽。本文的研究结果可为具有外场频率调节性能的BPLC材料的发展提供一定的理论和实验指导。

2 实验

2.1 双频液晶的合成和表征

DFLC的合成路线如图1所示。图1(a)在500mL单口圆底烧瓶中加入15.6 g(100 mmol) 2-氟-4-羟基苯甲酸和8.6 g(5 mmol)对甲基苯磺酸,用100 mL乙醚溶解,然后在15 min缓慢滴加14.0 mL 3,4-二氢吡喃并进行磁力搅拌。室温反应16 h后,过滤,沉淀用100 mL乙醚洗3遍,干燥后得到羟基保护产物白色粉末M1。产率约

为70.4%。图1(b)在500 mL单口圆底烧瓶中加入12.0 g(50 mmol)M1,8.2 g(50 mmol)正戊基苯酚和0.09 g(0.75 mmol)DMAP,用200 mL二氯甲烷溶解,然后将1.6 g(7.5 mmol)DCC溶解在10 mL二氯甲烷中,在30 min缓慢滴加并进行磁力搅拌。室温反应24 h后,过滤旋蒸得到粗产物。粗产物经过硅胶层析柱提纯,淋洗剂选用二氯甲烷,干燥后得到酯化产物白色粉末M2。产率约为78.5%。图1(c)在500 mL单口圆底烧瓶中加入19.3 g(50 mmol)M2,用100 mL无水乙醇。溶液边搅拌边加入2滴稀HCl,然后加热烧瓶致溶液边澄清。室温反应12 h后,向溶液中

倒入200 mL去离子水,再用50 mL二氯甲烷萃取3次,有机层加入无水MgSO₄干燥,过滤旋蒸后得到粗产物。最后无水甲醇重结晶得到脱保护产物白色粉末M3。产率约为89.5%。图1(d)在500 mL单口圆底烧瓶中加入15.1 g(50 mmol)M3,9.6 g(50 mmol)正戊基苯甲酸和0.09 g(0.75 mmol)DMAP,用200 mL二氯甲烷溶解,然后将1.6 g(7.5 mmol)DCC溶解在10 mL二氯甲烷中,在30 min缓慢滴加并进行磁力搅拌。室温反应24 h后,过滤旋蒸得到粗产物。粗产物经过硅胶层析柱提纯,淋洗剂选用二氯甲烷,干燥后得到最终产物白色粉末。产率约为81.2%。

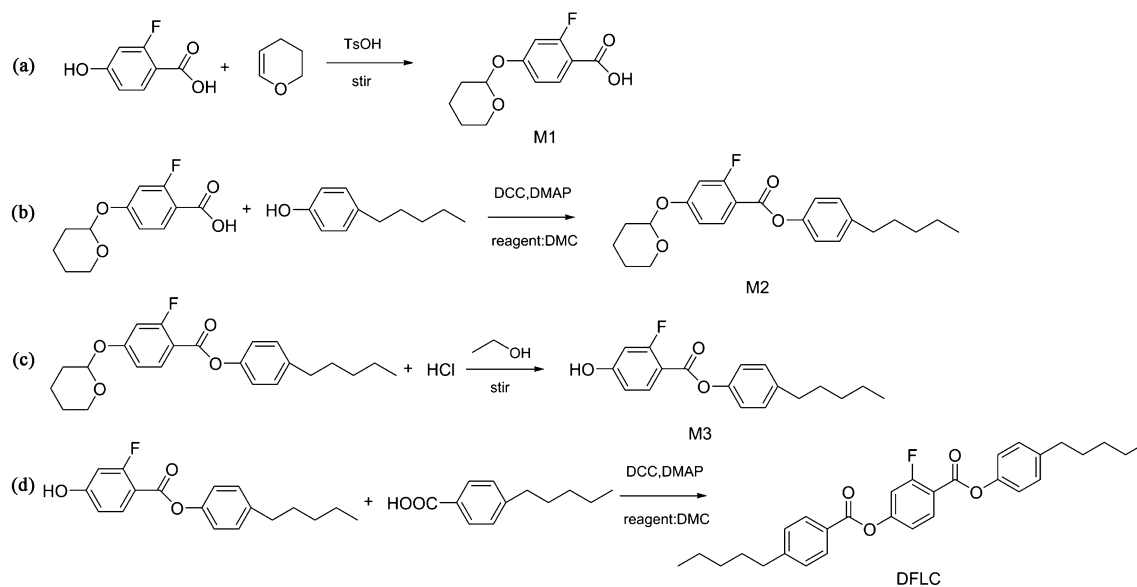


图1 DFLLC的合成路线图(a~d)

Fig.1 Synthetic route of the DFLLC(a~d)

核磁共振氢谱¹H NMR (400 MHz, CDCl₃) δ : 8.18 (t, $J=8.4$ Hz, 1H, Ar—H), 8.11 (d, $J=8.0$ Hz, 2H, Ar—H), 7.34 (d, $J=8.0$ Hz, 2H, Ar—H), 7.29~7.21 (m, 4H, Ar—H), 7.16 (dd, $J=16.6, 7.9$ Hz, 2H, Ar—H), 2.71 (t, $J=7.7$ Hz, 2H, —CH₂—), 2.63 (t, $J=7.7$ Hz, 2H, —CH₂—), 1.74~1.52 (m, 4H, —CH₂—), 1.46~1.25 (m, 8H, —CH₂—), 0.91 (t, $J=6.0$ Hz, 6H, —CH₃)。

2.2 蓝相材料的制备

混配蓝相液晶的材料为:两种手性掺杂剂 ISO (6OBA)₂ (Merck Co., Ltd) 和 R811 (Merck Co., Ltd),商用混晶(SLC-X,石家庄诚志永华显示材料

有限公司, $\Delta n=0.235$, $\Delta \epsilon=29.6$, 25 °C)。材料比例(质量分数)为:SLC-X/ISO(6OBA)₂/R811=82.0/8.0/10.0。将 DFLLC 加入到蓝相液晶中,比例为15%(质量分数)。所用材料及结构式如图2所示。

2.3 液晶盒的制备

本实验使用的面内切换(IPS)液晶盒是由两块玻璃组装而成的,一块是普通玻璃,另一块上面镀有氧化铟锡(ITO)的交叉电极,电极的宽度和电极之间的距离均为5.0 μm 。使用10.0 μm 厚的聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)膜作为液晶盒的间隔垫,不需要使用表面取向层。LC在各向同性态通过毛细管作用填充到液晶盒中,然后以0.5 °C·min⁻¹的速率冷却至BP温度。通过施加不

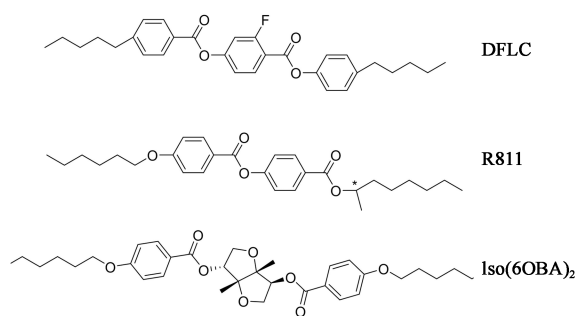


图 2 材料的化学结构式及简称

Fig.2 Chemical structures of the materials used

同频率的电场(方波电压, $10.0 \text{ V} \cdot \mu\text{m}^{-1}$), 观察其织构及透射率。

2.4 测试方法

使用配备有热台(Linkam Scientific LTS 350)的偏振光学显微镜(POM, Zeiss Axio Scope A1)研究介晶性质。在差示扫描量热仪(Perkin-Elmer DSC 8000)上以 $10 \text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$ 的加热和冷却扫描速率研究液晶的热行为, 样品在空气中密封在铝盒中并且保持气氛为干燥氮气。吸热峰和放热峰的峰值温度作为相变温度。不同频率电场的发生装置是任意函数发生器(Tektronix AFG3022C)和高速双极放大器(NF HSA4051)。通过精密阻抗分析仪(Agilent 4294A)测量液晶的介电常数和频率响应, 分别用垂直取向和平行取向的液晶盒测量平行介电常数($\epsilon_{\parallel}$)和垂直介电常数($\epsilon_{\perp}$)。通过公式(1)计算介电各向异性:

$$\Delta\epsilon = \epsilon_{\parallel} - \epsilon_{\perp}. \quad (1)$$

电光(E-O)性能由 LCD 综合参数仪器(北方液晶工程研发中心 LCT-5066C)测试。测试 IPS 盒, 偏振片正交, 样品相对于入射光以 45° 角倾斜放置, 并且通过精确校准的温度控制器(北方液晶工程研发中心 EOT-01)控制温度, 误差在 $\pm 0.5 \text{ }^\circ\text{C}$ 。开态过程的响应时间定义为 t_{90-10} (t_{on}), 这是从初始状态 10% 透射率到饱和状态的 90% 增加的时间。而对于关态过程, 它被定义为 t_{10-90} (t_{off}), 这是透射率从饱和状态 90% 透射率降到初始状态 10% 的时间。

3 结果与讨论

3.1 双频液晶的相态行为

通过 POM 和 DSC 表征了 DFLC 的液晶相

行为, 如图 3 所示。合成的 DFLC 在很宽的温度范围内具有向列相。在加热过程中, 它分别经历了从结晶相($53.3 \text{ }^\circ\text{C}$), 向列相的纹影织构到各向同性相($163.1 \text{ }^\circ\text{C}$)的转变。在降温过程中, 则是 Iso($160.8 \text{ }^\circ\text{C}$)N($36.9 \text{ }^\circ\text{C}$)Cr 的变化。

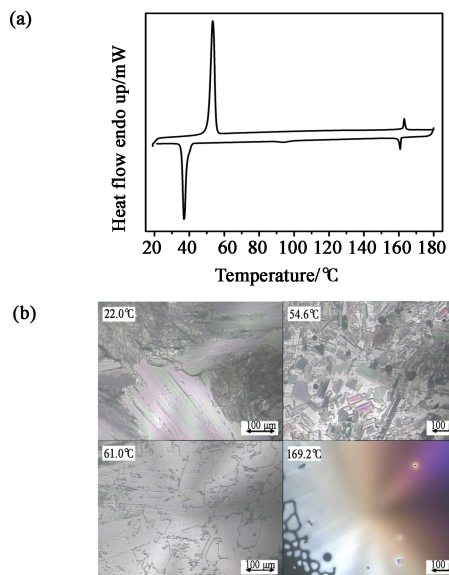


图 3 (a)DFLC 的 DSC 曲线;(b)升温过程中的偏光图片。

Fig.3 (a) Differential scanning calorimetry curve of DFLC; (b) POM photographs of DFLC at different temperatures upon heating.

3.2 双频液晶的介电各向异性

本文测量了不同电场频率下 DFLC 的 $\epsilon_{\parallel}$ 和 $\epsilon_{\perp}$, 并计算了相应的 $\Delta\epsilon$, 如图 4 所示。可以看出 $\epsilon_{\parallel}$ 受频率影响较大, 随着频率的增加而降低, 分别在 10^4 Hz 和 10^5 Hz 处有两个拐点, 对应于介电弛豫和色散。 $\epsilon_{\perp}$ 在低频时随频率变化较小, 在高频时随着频率的增加而降低。实验结果表明, 制备的 DFLC 具有双频响应特性, $\Delta\epsilon$ 在 100 Hz 时为 0.9, 随着频率的增加, $\Delta\epsilon$ 减小并在 12 kHz 时降低为 0, 随着频率继续增大 $\Delta\epsilon$ 可降至最小值 -0.5 。由此可见, 制备的 DFLC 的 f_c 是 12 kHz 。

3.3 双频蓝相液晶的频率响应

通过在 BPLC 中添加 DFLC, 制备了 DF-BPLC 混合物, 其随频率变化的相变行为和介电各向异性如图 5 所示。介电各向异性在低频电场作用下变化不大, 在高频电场下迅速减小。各相态相变温度(包括 Iso-BP, BP-Ch, I-Ch)均随着频率的增加呈现先增加后减少的趋势。从图中可以

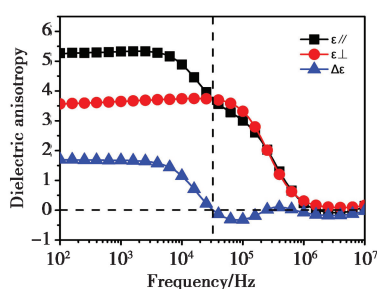


图4 DF-LC 介电各向异性的频率响应

Fig. 4 Dielectric anisotropy of the DF-LC at different frequencies

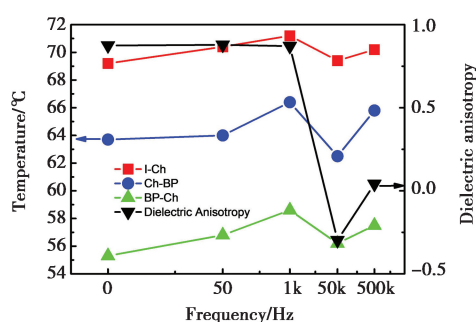


图5 DF-BPLC 的相转变温度及介电各项异性随频率的变化

Fig.5 Phase-transition temperature during the cooling process and the dielectric anisotropy of DF-BPLC at different frequencies

看出,相变温度变化的趋势与介电各向异性的变化趋势一致。

为研究 DF-LC 的添加对蓝相性能的影响,本文使用未添加 DF-LC 的 BPLC 灌入相同的液晶盒中

作为对比样品。在双频电场下,两个 BPI 温度范围在低频和高频下变窄,但 BPI 范围在低频时减小较少,如图 6 所示。加入 DF-LC 后,在不同频率的电场下,DF-BPLC 有着不同的织构,图 7(a~c)为其在 IPS 盒中的 POM 照片,其中暗处是交叉电极,亮处是液晶。蓝相温域如图 7(d)所示,当从各向同性状态冷却时,开始出现了胆甾相的小球织构,与各向同性相分离,接着缓慢降温出现了 BPI 的血小板织构。随后随着温度的进一步降低,重新出现了胆甾相的焦锥结构。在不施加电场的情况下,DF-BPLC 的 BP 温域为 8.4 °C。在低频(50 Hz)的电场下,BP 的温域拓宽到 10.0 °C,但在高于 f_c 的高频(50 kHz)下,温域缩小到 7.6 °C。

从图 7 中可以看出,电场可以主动影响 BP 的温度以及透射率。这是因为 BP 的光学各向同性,当由电场驱动时,它具有电致伸缩并且其 RI 改变。通过添加 DF-LC 分子,BPI 的晶格将在高频下压缩或在低频下伸长^[17]。由电场驱动的 DF-BPLC 的示意图见图 8。样品在无外加电场作用下为光学各向同性状态;在低频电场作用下,DF-BPLC 的介电各向异性常数为正,BP 的三维晶格结构在电场作用下沿平行电场方向拉伸;在高频电场作用下,DF-BPLC 的介电各向异性常数为负,BP 的三维晶格结构在电场作用下沿垂直电场方向拉伸。因此通过改变施加的外电场频率来反转折射率调制方向,从而使 DF-BPLC 具有电场频率响应特性。研究表明,DF-LC 有利于 BP 保持在电场下的稳定性,BP 具有弯曲的结构和大的挠曲电效应^[18],这是在电场下温域拓宽的可能原因。

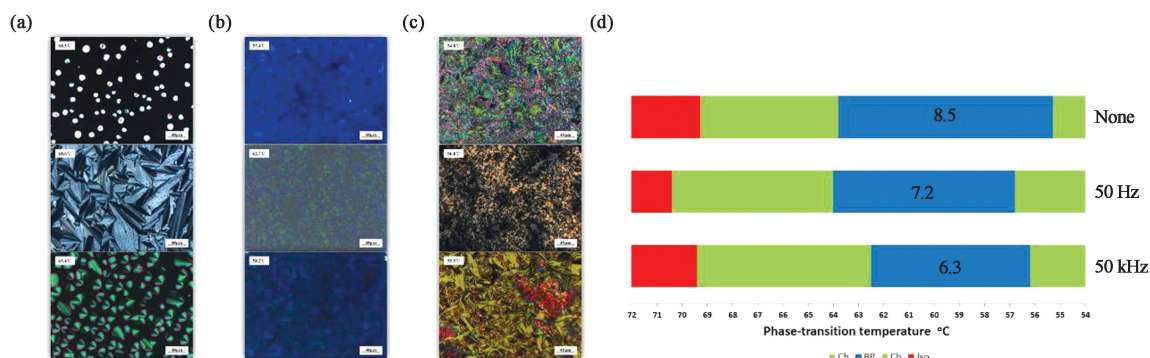


图6 BPLC 在不同电场(无电场/50 Hz/50 kHz)下的偏光照片:胆甾相(a)、蓝相(b)、重入胆甾相(c)和温域(d)。

Fig.6 POM photographs of BPLC in different LC phases at none/50 Hz/50 kHz electric field: cholesteric phase(a), blue phase(b), reentrant cholesteric phase(c) and temperature range(d).

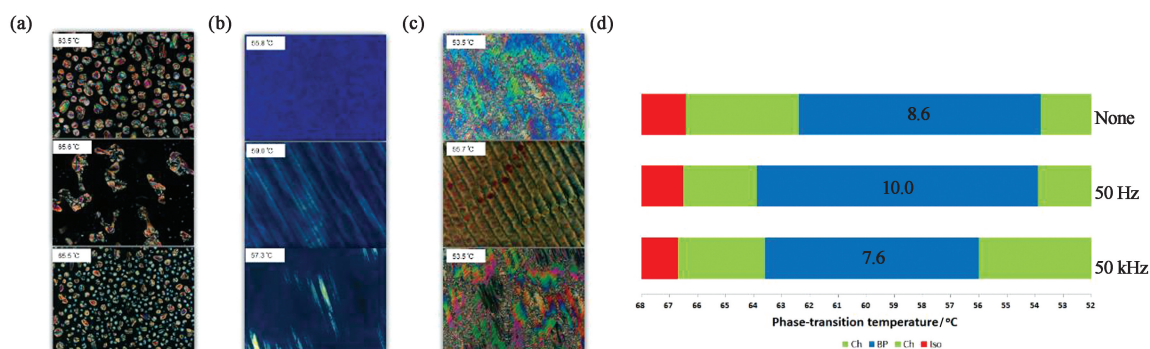


图 7 DF-BPLC 在不同电场(无电场/50 Hz/50 kHz)下的偏光照片:胆甾相(a)、蓝相(b)、重入胆甾相(c)和温域(d)。

Fig.7 POM photographs of DF-BPLC in different LC phases at none/50 Hz/50 kHz electric field: cholesteric phase(a), blue phase(b), reentrant cholesteric phase(c) and temperature range(d).

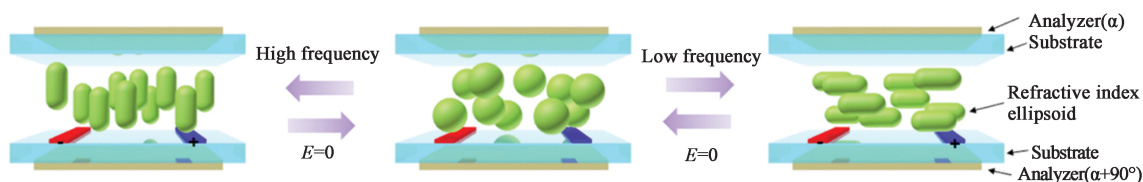


图 8 DF-BPLC 频率响应示意图

Fig.8 Mechanism of DF-BPLC driven by different frequencies electric field

3.4 双频蓝相液晶的电光性能

根据上述机理,DF-BPLC 同时具有优异的 E - O 特性和快速响应,其性能如图 9 所示。通过添加 DF-LC,DF-BPLC 具有比 BPLC 更低的阈值电压(40 V)和更高的对比度。在 100 V、50 Hz 时,BP-DFLC 的透过率(75%)比 BPLC (54%)大,这在显示领域中会有更好的应用前景。此外,DF-BPLC 的开态响应时间 t_{on} 和关态响应时间 t_{off} 分别为 6.9 ms 和 6.9 ms,BPLC 的为 7.0 ms

和 6.9 ms,没有滞后现象,比以前对 BP 响应时间(10 ms)的研究要短^[21-23]。这是 BP 电致伸缩的另一个证据。

由于 BP 的快速响应,BP 的双频响应优点在很大程度上不依赖于更快的频率切换,而是依赖于晶格的变形(压缩或伸长)。当在光传播方向上施加电场时,根据介电各向异性的符号或电场的方向,BP 的立方晶格可以变长或压缩。同时因为 BP 是光学各向同性的,这使得它们可以用于无需

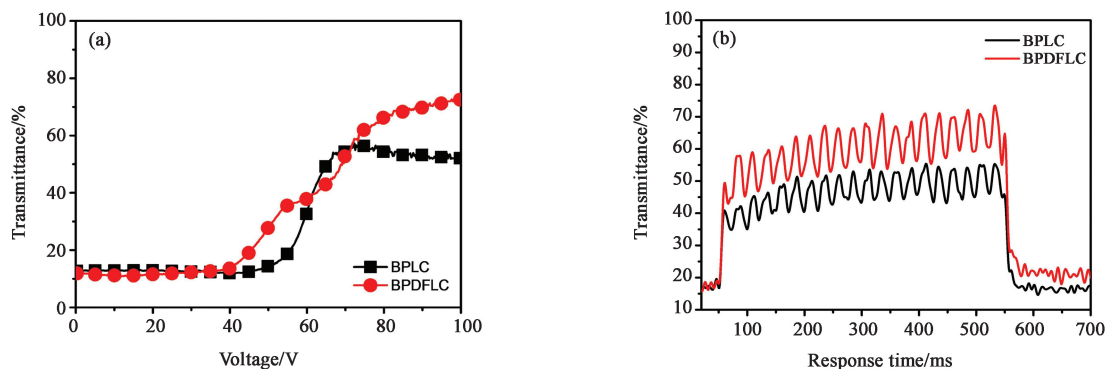


图 9 BPLC 和 DF-BPLC 电光性能(a)和响应时间(b)

Fig.9 E - O property (a) and response time (b) of BPLC and DF-BPLC

偏振的器件中。

4 结 论

本文通过分子设计和制备得到了较低临界转换频率的DFLC分子,临界转换频率约为12 kHz,并对其分子结构和相态进行了表征,其具有较宽的向列相温域。通过将所制备DFLC分子

添加到蓝相母体液晶中,制备得到了具有双频驱动性能的BP-DFLC,研究发现,通过施加不同频率的电场可调控BP温域。在低频电场下,BP温域可拓宽至10℃;在高频电场下,温域缩小到7.6℃。得益于频率驱动下蓝相晶格的压缩或伸长,所制备的BP-DFLC具有较低的驱动电压以及较快的响应时间,有望应用于快速响应的光电器件领域。

参 考 文 献:

- [1] YAN J, RAO L H, JIAO M Z, *et al.* Polymer-stabilized optically isotropic liquid crystals for next-generation display and photonics applications [J]. *J. Mater. Chem.*, 2011, 21(22): 7870-7877.
- [2] CAO W Y, MUÑOZ A, PALFFY-MUHORAY P, *et al.* Lasing in a three-dimensional photonic crystal of the liquid crystal blue phase II [J]. *Nat. Mater.*, 2002, 1(2): 111-113.
- [3] WRIGHT D C, MERMIN N D. Crystalline liquids: the blue phases [J]. *Rev. Mod. Phys.*, 1989, 61(2): 385-432.
- [4] KIKUCHI H. *Liquid Crystalline Blue Phases* [M]// KATO T. *Liquid Crystalline Functional Assemblies and Their Supramolecular Structures*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2008: 99-117.
- [5] KITZEROW H S. Blue phases come of age: a review [J]. *SPIE*, 2009, 7232: 723205.
- [6] SCHADT M. Liquid crystal materials and liquid crystal displays[J]. *Annu. Rev. Mater. Sci.*, 1997, 27: 305-379.
- [7] XIANYU H Q, WU S T, LIN C L. Dual frequency liquid crystals: a review [J]. *Liq. Cryst.*, 2009, 36(6/7): 717-726.
- [8] WANG C H, WU C C, YANG Y T, *et al.* Reverse-mode polymer-stabilized dual-frequency cholesteric texture cell for dual mode operations [J]. *J. Displ. Technol.*, 2012, 8(11): 663-668.
- [9] MA J, SHI L, YANG D K. Bistable polymer stabilized cholesteric texture light shutter [J]. *Appl. Phys. Express*, 2010, 3(2): 021702.
- [10] XU M, YANG D K. Electrooptical properties of dual-frequency cholesteric liquid crystal reflective display and drive scheme [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 1999, 38: 6827-6830.
- [11] LIN F C, LEE W. Color-reflective dual-frequency cholesteric liquid crystal displays and their drive schemes [J]. *Appl. Phys. Express*, 2011, 4(11): 112201.
- [12] HSIAO Y C, WU C Y, CHEN C H, *et al.* Electro-optical device based on photonic structure with a dual-frequency cholesteric liquid crystal [J]. *Opt. Lett.*, 2011, 36(14): 2632-2634.
- [13] HSIAO Y C, HOU C T, ZYRYANOV V Y, *et al.* Multichannel photonic devices based on tristable polymer-stabilized cholesteric textures [J]. *Opt. Express*, 2011, 19(24): 23952-23957.
- [14] HSIAO Y C, ZOU Y H, TIMOFEEV I V, *et al.* Spectral modulation of a bistable liquid-crystal photonic structure by the polarization effect [J]. *Opt. Mater. Express*, 2013, 3(6): 821-828.
- [15] XU M, YANG D K. Dual frequency cholesteric light shutters [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1997, 70(6): 720-722.
- [16] HUANG C Y, FU K Y, LO K Y, *et al.* Bistable transfective cholesteric light shutters [J]. *Opt. Express*, 2003, 11(6): 560-565.
- [17] YABU S, YOSHIDA H, LIM G, *et al.* Dual frequency operation of a blue phase liquid crystal [J]. *Opt. Mater. Express*, 2011, 8(1): 1577-1584.
- [18] MANGELINCKX G, BEECKMAN J, CHOJNOWSKA O, *et al.* Fast polarisation-insensitive optical shutter supported by backflow in dichroic dye-doped dual-frequency liquid crystal [J]. *Liq. Cryst.*, 2014, 41(11): 1553-1558.
- [19] DUAN W, CHEN P, WEI B Y, *et al.* Fast-response and high-efficiency optical switch based on dual-frequency liquid crystal polarization grating [J]. *Opt. Mater. Express*, 2016, 6(2): 597-602.
- [20] WANG X Q, YANG W Q, LIU Z, *et al.* Switchable Fresnel lens based on hybrid photo-aligned dual frequency

- nematic liquid crystal [J]. *Opt. Mater. Express*, 2017, 7(1): 8-15.
- [21] COLES H J, PIVNENKO M N. Liquid crystal ‘blue phases’ with a wide temperature range [J]. *Nature*, 2005, 436(7053): 997-1000.
- [22] TAUSHANOFF S, VAN LE K, WILLIAMS J, *et al.* Stable amorphous blue phase of bent-core nematic liquid crystals doped with a chiral material [J]. *J. Mater. Chem.*, 2010, 20(28): 5893-5898.
- [23] LEE M, HUR S T, HIGUCHI H, *et al.* Liquid crystalline blue phase I observed for a bent-core molecule and its electro-optical performance [J]. *J. Mater. Chem.*, 2010, 20(28): 5813-5816.

作者简介:



李辰悦(1988—),男,四川成都人,博士研究生,2011 年于北京科技大学获得学士学位,主要从事液晶及纳米粒子制备和功能化方面的研究。E-mail: li.rk@163.com