

文章编号:1007-2780(2012)06-0752-07

蓝相液晶及其在微透镜器件中的应用

李 青^{1,2}, 严 静¹, 崔勇扬¹

(1. 东南大学 电子科学与工程学院 显示技术研究中心, 江苏 南京 210096, E-mail: liqing@seu.edu.cn;
2. 江苏省信息显示工程技术研究中心, 江苏 南京 210096)

摘 要: 聚合物稳定蓝相液晶(PSBPLC)具有响应速度达到亚毫秒量级, 偏振光独立及工艺无需取向工艺等特点, 在显示技术及光电子器件领域有潜在的巨大应用空间。文章论述了 PSBPLC 微观相变模型、宏观克尔效应等特性。在此基础上, 论述了蓝相液晶微透镜技术的发展。介绍了 PSBPLC 实现微透镜阵列的主要结构, 包括圆孔电极的蓝相液晶透镜; 曲面电极的蓝相液晶透镜; 多电极蓝相液晶 GRIN 透镜; 模式控制的蓝相液晶透镜, 以及采用 ZnO 纳米棒为电极实现蓝相液晶透镜, 对比了上述几种透镜的结构和特点。

关 键 词: 聚合物稳定蓝相液晶; 克尔效应; 微透镜

中图分类号: O43; O753+.2 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3788/YJYXS20122706.0752

Blue Phase Liquid Crystals and Its Application in Microlens

LI Qing^{1,2}, YAN Jing¹, CUI Yong-yang¹

(1. Display Center, School of Electronic Science and Engineering, Southeast University,
Nanjing 210096, China, E-mail: liqing@seu.edu.cn;
2. Jiangsu Information Display Engineering Research Center, Nanjing 210096, China)

Abstract: Polymer-stabilized blue phase liquid crystals (PSBPLC) within wide temperature range attract many attentions, such as fast response time short as sub-millisecond, alignment-free and polarization independent. It has potential huge application for PSBPLC both in display technology and optical-electronic devices. The micro phase model and Kerr effect for PSBPLC were described. This paper introduced for PSBPLC development in microlens technology including main kinds of microlens structures such as BPLC microlens with hole pattern, adaptive BPLC microlens with curved electrode, BPLC GRIN microlens, BPLC microlens with resistive film and BPLC microlens with ZnO nano-rod electrode.

Key words: polymer-stabilized blue phase liquid crystals; kerr effect; microlens

1 引 言

蓝相液晶是介于液晶的各向同性相和胆甾相之间的状态, 宏观上蓝相态是各项同性的。根据结构的不同, 蓝相液晶又分为 BP_I、BP_{II}、BP_{III} 3 种相态。宏观上表现为蓝相只能存在于很窄的温度区间内, 通常只有 0.5~2 K 的存在范围, 长期

以来没有应用价值。直到 2002 年, Kikuchi 等人^[1]提出了聚合物稳定的蓝相液晶(PSBPLC, Polymer Stabilized Blue Phase Liquid Crystals), 使蓝相液晶的存在温度范围扩大到包括室温在内的 60 K 范围, 从而具备了巨大的应用潜力。

蓝相液晶的工作机理完全不同于传统的向列相液晶器件。宏观上说, 蓝相液晶的工作机理是

收稿日期: 2012-05-18; 修订日期: 2012-08-16

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863)(No. 2012AA03A302)

作者简介: 李青(1964—), 女, 江苏南京人, 博士, 教授, 主要从事显示电子学, 包括液晶显示、液晶光电子器件等工作。

基于克尔效应(Kerr effect),不加电场时,蓝相液晶是各向同性的;施加电场后,分子沿长轴方向变化,表现出物理特性的各向异性,而其分子的变化是在局部位置发生,因此,蓝相液晶最大的优点是具有超快的响应时间,其响应时间可以达到亚毫秒量级^[2]。

蓝相液晶在显示技术领域已引起了巨大的冲击,将对现有的 LCD 技术带来革命性的变革,从而引起相关研究领域的高度重视。亚毫秒的快速响应特性使时序扫描技术实现彩色成为可能;无需取向层及对盒厚变化的不敏感性使显示器件的制备技术更加简单,成本进一步降低。可以预期,这些特性也使蓝相液晶在新型光电子器件研制中将产生极大竞争力,成为一种需要重点研究的液晶材料,虽然这些研究才刚刚起步。

蓝相液晶在外电场作用下产生相位延迟特性,使其在微透镜阵列方面应用成为可能,将蓝相液晶应用于微透镜技术公开的研究成果见于 2010 年。本文在综述蓝相液晶特性基础上,将重点介绍蓝相液晶在微透镜技术的研究结果,并分析其特点。

2 聚合物稳定的蓝相液晶

2.1 双扭曲微观物理模型

蓝相液晶只有在波矢 q_0 增加到一定值时才出现的一种液晶态,根据晶态结构不同分为 BP_I、BP_{II}、BP_{III} 三种相,见图 1,可以看出蓝相液晶存在的温度范围很小,波矢较小时通常只看到随温度升高,胆甾相直接变成各向同性相,因此,蓝相液晶是在一些特定条件下产生的一种液晶态。目前研究蓝相液晶的基本模型是双扭曲结构模型,见图 2 所示。双扭曲模型是目前研究蓝相液晶物理变化过程基本的微观模型^[3]。此模型是对理想的蓝相液晶建立的。从已有的微观实验观察可得,基本表现为畴结构的变化及其边界间的相互影响。其中 BP_I 和 BP_{II} 微观结构上,双扭曲柱体交错排列形成一个立方晶格单元。对应蓝相液晶 BP_I、BP_{II} 晶体结构示意图如图 3 所示,图 3 中(a)示意了具有双扭曲结构的圆柱,它构成了蓝相液晶结构中的支架,(b)表示了对应于 BP_I、BP_{II} 相的晶态结构,(c)示意了相应的向错线。由于双扭曲柱体结构无法填满晶格空间,立方结构存在缺陷,导致结构的不稳定,因此理想的蓝相液

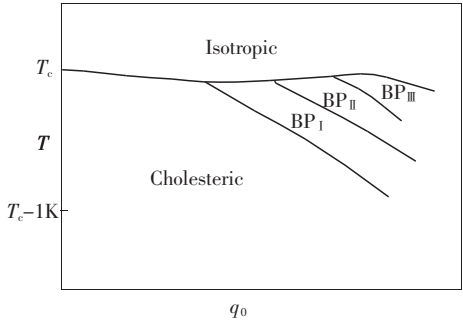


图 1 在温度-手性平面中液晶相位示意图
Fig. 1 Diagrammatic phase diagram for the 3 blue phases as a function of chirality and temperature

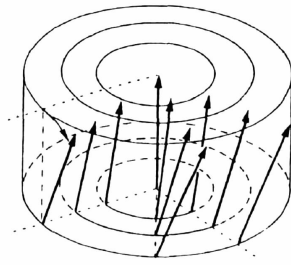


图 2 BPLC 的双扭曲模型示意图
Fig. 2 Double twist model of BPLC

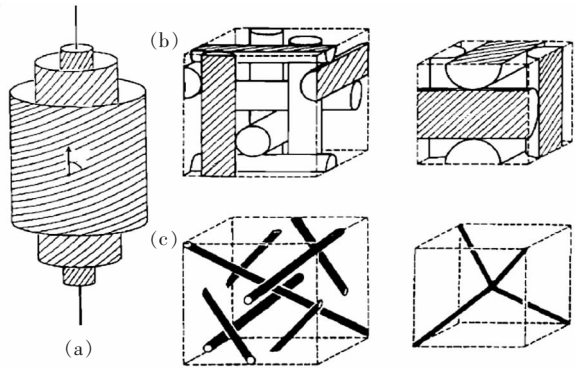


图 3 (a) 双扭曲结构, (b) BP_I 和 BP_{II} 的晶态结构, (c) BP_I 和 BP_{II} 向错线示意图
Fig. 3 (a) Double twist cylinder. (b) Arrangement of double twist cylinders in the unit cells of BP_I and BP_{II}. (c) Arrangement of disclination tubes in the unit cells of BP_I and BP_{II}.

晶温区很窄,不能实用。

图 4 所示的是一种由 Kakuchi 在文献[1]中提出的 PSBPLC 结构的一种构想,它形象地表示了聚合物在蓝相液晶晶态结构中所起的作用,即使蓝相液晶中存在的向错线更加稳定,从而使蓝相液晶的畴结构更加稳定,这是导致 PSBPLC 在

较宽稳定范围存在的根本原因。但随着聚合物的添加,带来的负面影响就是驱动电压增高,响应时间变慢。而对于 PSBPLC,聚合物添加后,宏观上表现稳定温度范围扩大,但响应时间变慢,相变电压提高,液晶材料在电场中相变的微观过程变得十分复杂。基于双扭曲模型,结合液晶向错理论,以 PSBPLC 为研究对象,重点研究聚合物网络如何影响蓝相液晶的相变过程,如何影响其物理参数的变化及响应时间的变化等基本理论问题,是研究 PSBPLC 的微观相变模型的思路。

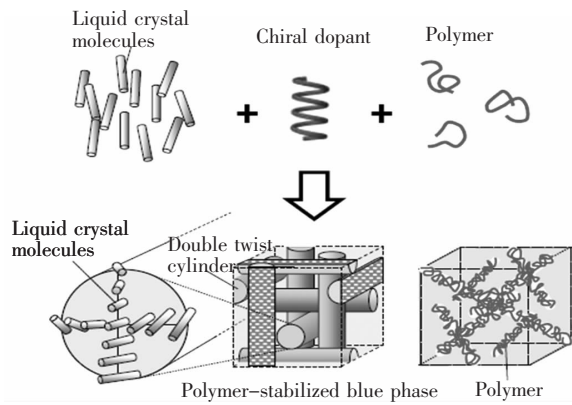


图 4 PSBPLC 的组成及结构示意图

Fig. 4 Composition and structure of PSBPLC

2.2 克尔效应

蓝相液晶在不加电场情况下表现为各向同性,当施加电场时,液晶分子沿电场方向拉长(对于正性液晶)或者垂直于电场方向拉长(对于负性液晶),表现出各向异性。其特性宏观上在低电场满足克尔效应:

$$\Delta n_{ind} = \lambda K E^2$$

(1)

其中, Δn_{ind} 为场致双折射, λ 为入射光波长, E 为外加电场, K 为克尔系数。

随着电场的提高,对于蓝相液晶, Δn 趋于饱和,达到液晶材料的饱和双折射值 Δn_{sat} ,因此,扩展的克尔效应模型被提出^[4-5],如公式(2)所示。

$$\Delta n_{ind} = \Delta n_{sat} \{1 - \exp[-(E/E_s)^2]\}$$

(2)

克尔系数 $K = \Delta n_{sat} / (\lambda E_s^2)$,克尔系数与波长有依存关系,随波长增大而降低^[6]。 K 与温度变化相关,随温度升高而减小^[7]。同时, K 还受到频率的影响,随着频率增加而减小,文献[8]提出了 $K(f)$ 满足扩展的 Cole-Cole 方程。

图 5 为 Yan. Li 等人^[8]测出的 PSBPLC 液晶在不同电场下折射率的变化。可以看出在高场区

场致双折射有明显的饱和趋势,并且在低场、高场情况下实验数据和公式的拟合得很好。

可以看出,蓝相液晶的分子在克尔效应下实现了各向同性与各向异性的转变,并不依赖于传统向列相液晶而是依赖于取向层得到一些特定的分子排列,这就形成了蓝相液晶在制造时的优势,无需取向层,并对盒厚微变不敏感,带来制造工艺的便利。

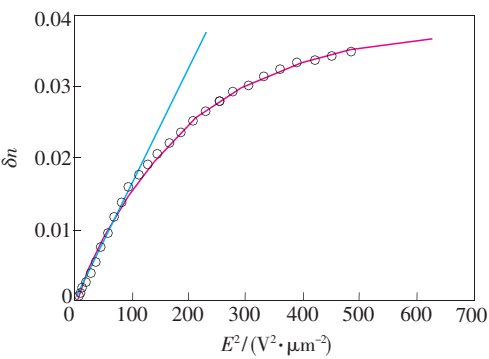


图 5 测量的折射率变化(圆圈)、克尔效应公式拟合(蓝色直线)和扩展克尔效应(红色)公式拟合。

Fig. 5 Measured refractive index change (circles), fittings with Kerr effect (blue line) and the extended Kerr effect (red line)

3 蓝相液晶微透镜技术

由于蓝相液晶具有短的相干长度使响应时间加快至亚毫秒级,使其不仅在液晶显示技术方面,而且在光电子器件方面具有潜在的应用空间。尤其,随着 3D 技术的发展,对自适应液晶透镜阵列的响应速度有了进一步的需求,采用快速响应的蓝相液晶用于透镜阵列的研究成为一种方向。下面介绍几种蓝相液晶的透镜技术。

3.1 圆孔电极的蓝相液晶透镜

Y. H. Lin 在文献[9]提出了一种基于 PSB-PLC 纯相位调制的圆孔电极微透镜阵列,具有偏振光无关、快速响应的特点。由于入射光沿 PSB-PLC 光轴传播使光学相移是偏振光无关的,而克尔效应形成的场致双折射产生了电场控制的自适应相移特性。图 6 是圆孔电极蓝相液晶透镜结构示意图,图中表示了在电场作用下的有效光学折射率椭球变化。PSBPLC 放在两片玻璃之间,上面玻璃基板内表面光刻为 Al 膜的直径为 w 的圆孔电极。下基板为 ITO 公共电极。当 $V=0$,有效光学折射率椭球为球状,意味着光学各向同性。

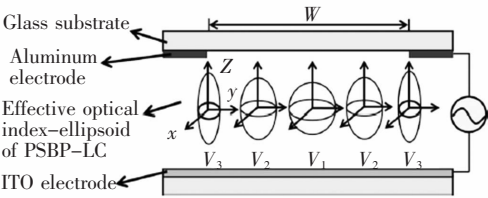


图 6 圆孔电极的蓝相液晶透镜

Fig. 6 BPLC lens with hole electrode

当施加电压并超过阈值时，由于克尔效应有效光学折射率椭球变长，并且光轴方向平行于 z 轴。在圆孔中心及边缘产生的不均匀电场，中心电压逐步低于边缘电压，因此边缘的有效光学折射率椭球变长的程度强于中心，这样的折射率空间分布使 PSBPLC 形成了类似于透镜的相位轮廓，产生了偏振光无关的自适应透镜。

透镜的焦距可用公式(3)表示：

$$f = \pi \omega^2 / 4\lambda / \Delta\delta \tag{3}$$

其中， $\Delta\delta$ 为边缘电压与中间电压差产生的相位移，可表示为：

$$\Delta\delta = 2\pi d / (n_o - n_e) / 3 / \lambda \tag{4}$$

可以看到，这种透镜的焦距取决于圆孔直径及中间与边缘的相移量，对于微透镜阵列， ω 一般在 1 mm 左右，而对于 PSBPLC，变化量较小，由于相移量较小使焦距较大，这对于微透镜的短焦距应用受到局限。

3.2 曲面电极的蓝相液晶透镜

圆孔电极蓝相液晶微透镜虽然实现了透镜的基本功能，还存在一些需要改进的地方，如由于折射率不能得到理想的透镜形状导致图像质量下降，由于圆孔边缘较强的横向场导致两个正交的偏振光(TE 和 TM)产生焦距分离的现象等。

Y. Li 在文献[10]中针对上述问题，提出了一种基于 PSBPLC 的曲面电极微透镜阵列，同样具有偏振光无关、快速响应的特点，并且改进了透镜特性。该透镜是利用曲面电极和平板电极间产生的梯度电场，控制 BPLC 分子由克尔效应产生的场致双折射变化，从而获得所需的透镜相位阵面。通过优化电极形状设计，可以得到理想的抛物线相位阵面。图 7 是曲面电极蓝相液晶透镜结构示意图，上基板呈微透镜状，在上基板内表面镀有 ITO 电极，并且填充有聚合物，PSBPLC 在聚合物及平面下基板玻璃之间。当 $V=0$ ，PSBPLC

分子有效光学折射率椭球呈球状，即光学各向同性。当施加电压并超过阈值时，在克尔效应作用下，PSBPLC 分子有效光学折射率椭球变长，且光轴方向平行于 z 轴。由于上基板微透镜中心部分存在较多的聚合物，产生较大压降，故电场强度从边缘向中心递减，因此边缘的有效光学折射率椭球变长的程度强于中心，这样的折射率空间分布使 PSBPLC 形成了类似于透镜的相位轮廓，产生了偏振光无关的自适应透镜。通过设计上基板曲面电极形状，为凸透镜状，凹透镜状或者埃菲尔铁塔状，可以得到不同的凹凸透镜，并且可以优化得到理想的抛物线状相位分布如图 8 所示。

图 8 显示，通过对曲面电极形状的优化设计，可以改善 TE、TM 的透镜相位轮廓，从而改善焦距分离的现象。

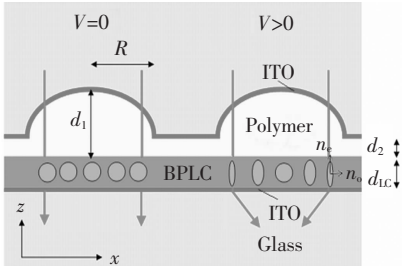


图 7 曲面电极的蓝相液晶透镜

Fig. 7 BPLC lens with microlens array structure electrodes

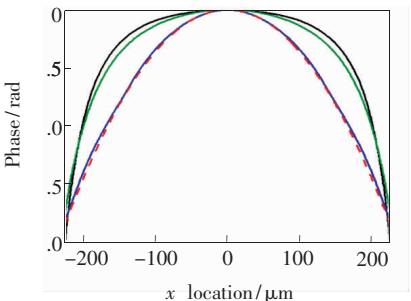
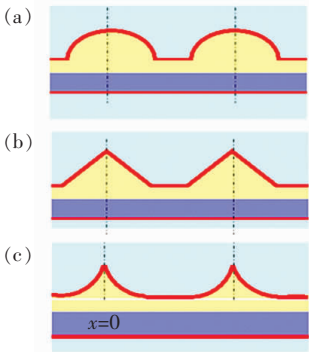


图 8 曲面电极形状对相位曲线影响

Fig. 8 Effect of top substrate shape on the generated phase profile

3.3 多电极的蓝相液晶透镜

文献[10]采用曲面电极对透镜性能有所改善,但在制备工艺上难度较大。为了获得更理想的抛物线相位阵面,同时可以采用平面电极的工艺,Chao-Te Lee 在文献[11]中提出了多电极控制的蓝相液晶透镜。该结构液晶透镜同样具有偏振无关,快速响应及相位阵面为理想抛物线状等特点。其结构如图 9 所示。PSBPLC 位于上下玻璃基板之间,上基板电极上覆盖有高介电常数的介质层,用来平滑垂直方向的电场分布情况。通过优化设计各电极尺寸及驱动电压分布,可以得到近似理想的抛物线相位分布。

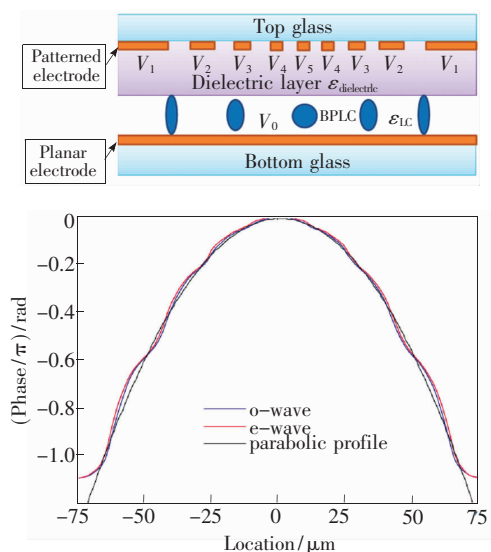


图 9 多电极透镜及相位曲面分布

Fig. 9 Multi-electrode BPLC lens and phase profile

3.4 模式控制的蓝相液晶透镜

多电极的蓝相液晶透镜为实现理想透镜相位轮廓分布,必须对多电极寻址,并且需要制备高介电常数的介质层,以克服不同偏振光对焦距特性的影响。Y. Li 在文献[12]中提出了利用电阻膜的模式控制蓝相液晶柱透镜,利用低场区的线性克尔效应实现单一电极寻址即可获得透镜相位的轮廓分布。图 10 是模式控制 PSBPLC 透镜的结构示意图。在上基板上中心条状及位于边缘的两个边缘电极,在电极上方覆盖有一层透明的高阻层,底层电极即为覆盖有 ITO 平面电极的玻璃基板。当 $V=0$ 时,PSBPLC 光学各向同性,入射光直接经过样品,不发生偏转。当 $V>0$ 时,高阻层电势分布由方程(5)决定:

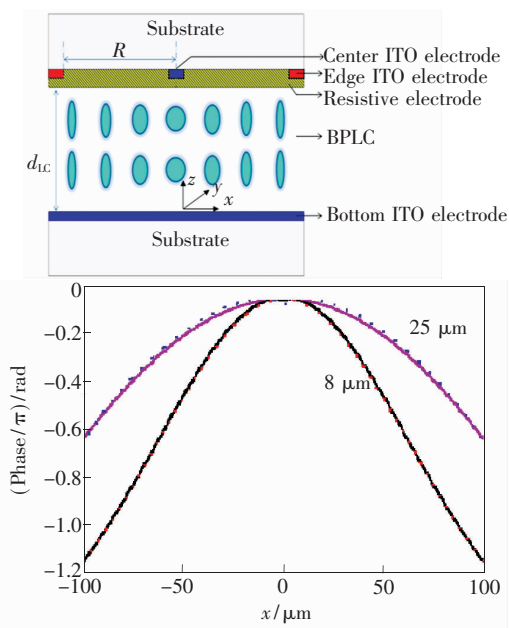


图 10 模式控制的蓝相液晶透镜及相位轮廓曲线

Fig. 10 Modal BPLC lens and phase profile

$$\nabla^2 V = \frac{\rho_R \omega \epsilon' j}{d_R d_{LC}} V + \frac{\rho_R \omega \epsilon''}{d_R d_{LC}} V \quad (5)$$

其中 ρ_R 为高阻层的电阻率, d_R 和 d_{LC} 分别是高阻层和液晶层的厚度, ω 是交流电压频率, ϵ' 和 ϵ'' 分别是液晶材料介电常数的实部和虚部。当电场沿 x 方向远大于另外两个方向时,方程(5)有近似解(6):

$$V = a \left[\exp \left(\sqrt{c} \exp \left(\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\theta}{2} \right) j \right) x \right) - \exp \left(-\sqrt{c} \exp \left(\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\theta}{2} \right) j \right) x \right) \right] \quad (6)$$

其中, a 是一个正实常数,

$$c = \frac{\rho_R \omega |\epsilon^*|}{d_R d_{LC}}, \epsilon^* = \epsilon' - \epsilon'' j = |\epsilon^*| \exp(-j\theta)$$

θ 是 ϵ' 和 ϵ'' 间的相位延迟。当 $\sqrt{c}|x| \ll 1$ 时, $|V| \approx 2a\sqrt{c}|x|$, 通过选择合适的参数设计,可以使得电压分布满足:

$$|V| = \frac{|x|}{R} V_0 \quad (7)$$

故 PSBPLC 在克尔效应下,

$$\Delta n_{ind} = \lambda K E^2 = \lambda K \frac{V^2}{d_{LC}^2} = \lambda K \frac{V_0^2}{d_{LC}^2 R^2} x^2 \quad (8)$$

对应的相位分布为:

$$\Phi(x) = 2\pi d_{LC} n_o / \lambda = 2\pi d_{LC} [(n_{iso} - \Delta n_{ind}/3)] / \lambda \quad (9)$$

呈抛物线状分布。当然,随着电压的进一步增加,

PSBPLC 场致双折射趋于饱和, 这样就会使相位分布偏离抛物线状。

3.5 ZnO 纳米棒蓝相液晶微透镜阵列

针对 3D 显示需要高分辨率透镜的需求, Q. Li 在文献[13]中提出了一种采用 ZnO 纳米棒为电极的 PSBPLC 液晶微透镜阵列, 该结构具有高分辨率, 快速响应等特点。其结构示意图如图 11 所示。纳米棒 ZnO 作为单个电极时附近的电场分布呈近似高斯分布, 相邻 ZnO 电极之间形成的不均匀电场对蓝相液晶进行调制。

当外加电压 $V=0$ 时, PSBPLC 光学各向同性。当上下基板之间电压 $U>0$ V 时, 由于透镜中心电场比边缘电场弱, 且 ZnO 纳米棒周围电场呈近高斯分布。当入射光偏振方向平行 X 轴向入射时, 经历的为 e 光, 等效折射率为 n_{eff} , 故边缘处相位延迟大于中心, 呈凹透镜。当入射光偏振方向垂直 X 轴向入射时, 经历的为 o 光, 当外加电压不是很高时, ZnO 电极边缘电场远大于中心区域, 透过中心区域入射的光相位延迟大于边缘区域, 呈凸透镜。而当外加电压逐渐增加, 场致折

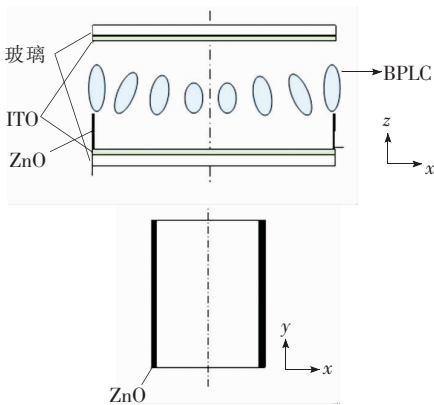


图 11 ZnO 纳米棒为电极的蓝相液晶透镜
Fig. 11 Structure of microlens with ZnO nanowire array electrode

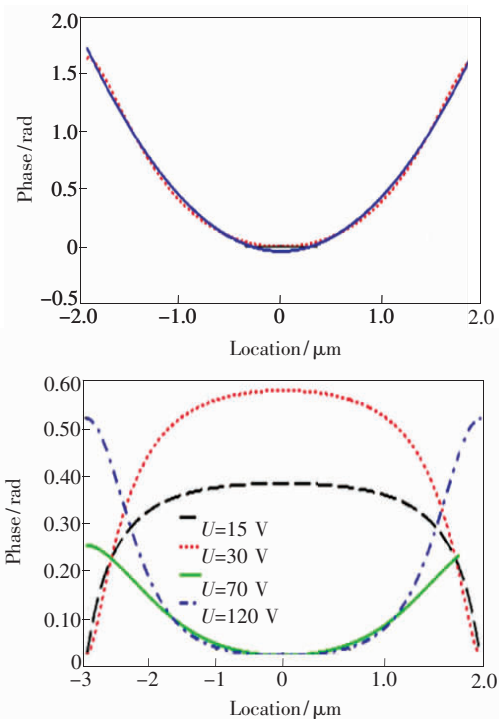


图 12 透镜相位随电压变化仿真结果, 实现不同特性的透镜。
Fig. 12 Simulated phase profiles across the lens for TM and TE waves

射率趋于饱和, 而 ZnO 电极下部区域电场较弱无法使液晶折射率达到饱和, 故此时边缘入射光相位延迟大于中心入射光, 呈凹透镜。通过调节电压, 可以实现凹凸透镜的转换, 如图 12 所示。

4 结 论

聚合物稳定蓝相液晶 (PSBPLC) 具有快速响应, 偏振光独立及工艺无需取向工艺等特点。对于其在自适应透镜的应用研究刚刚起步, 在器件结构设计、性能优化及新材料研制等方面需要进一步研究。研究工作充分表明, PSBPLC 在光电子器件领域与其显示技术领域一样有潜在的应用空间。

参 考 文 献:

[1] Kikuchi H, Yokota M, Hisakado Y, et al. Polymer-stabilized liquid crystal blue phases [J]. *Nature Mater*, 2002 (1):64-68.
[2] Yan J, Wu S T. Polymer stabilized blue phase liquid crystals [J]. *Optical Materials Express*, 2011, 1 (8): 1527-1535.
[3] Meiboom S, Sethna J P, Anderson P W, et al. Theory of the blue phase of eholesteric crystals [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1981, 46(18):1216-1219.
[4] Yan J, Cheng H C, Wu S T, et al. Extended Kerr effect of polymer-stabilized blue-phase liquid crystals [J]. *Appl.*

- [5] Yan J, Jiao M, Wu S T, *et al.* Direct measurement of electric-field-induced birefringence in a polymer-stabilized blue-phase liquid crystal composite [J]. *Opt. Express*, 2010, 18(11):11450-11455.
- [6] Jiao M, Yan J, Wu S T. Dispersion relation on the Kerr constant of a polymer-stabilized optically isotropic liquid crystal [J]. *Phys. Rev. E*, 2011, 83(4):041706.
- [7] Rao L H, Yang J, Wu S T, *et al.* A large Kerr constant polymer-stabilized blue phase liquid crystal [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2011, 98(8):081109(1-3).
- [8] Li Y, Chen Y, Sun J, *et al.* Dielectric dispersion on the Kerr constant of blue phase liquid crystals [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2011, 99(18):181126(1-3).
- [9] Lin Y H, Chen H S, Lin H C, *et al.* Polarizer-free and fast response microlens arrays using polymer-stabilized blue phase liquid crystals [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2010, 96(11):113505(1-3).
- [10] Li Y, Wu S T. Polarization independent adaptive microlens with a blue-phase liquid crystal [J]. *Optics Express*, 2011, 19(9):8045-8050.
- [11] Lee C T, Li Y, Wu S T, *et al.* Design of polarization-insensitive multi-electrode GRIN lens with a blue-phase liquid crystal [J]. *Optics Express*, 2011, 19(18):17402-17407.
- [12] Li Y, Liu Y F, Wu S T, *et al.* Polarization independent blue-phase liquid crystal cylindrical lens with a resistive film [J]. *Appl. Opt.*, 2012, 51:2568-2572.
- [13] Li Q, Yan J, Cui Y Y, *et al.* Characterization and development of phase modulated liquid crystal devices using ZnO nano-rod array electrodes[C]//SID 2012, Digest, St San Jose, US; SID, 2012:146-1465.

《液晶与显示》投稿指南

《液晶与显示》投稿方式为网上投稿。网上投稿便于您随时查询稿件的处理情况,方法为:登录本刊网站 <http://www.yjyxs.com>,进入“作者投稿”栏目,在线注册投稿。注册时“用户名”和“口令”由您设定,登录后按“提示”进行操作即可。稿件请用 Word 完成以便专家网上审理。

《液晶与显示》稿件发表的正常周期为3~6个月,缩短论文发表周期是学术论文的社会效益尽早实现的重要条件,而满足《液晶与显示》征稿简则,特别是第3项中(1)~(7)的要求,是稿件可以尽早编辑加工的必要条件。因此,您若希望论文能够早日发表,请您务必按“简则”写稿。

若您的稿件附有同行专家评语及单位推荐信,则您的稿件将优先发表,也欢迎您推荐 2~3 名审稿专家;同时,本刊更欢迎国家各重大科技攻关项目和基金课题产出的自主创新性文章。

《液晶与显示》稿件发表含印刷版、电子版和网络版,对版权有特殊要求者,请事先声明。