

文章编号:1007-2780(2017)03-0163-06

降低聚合物稳定蓝相液晶显示器 驱动电压的一种方法

马红梅*, 杨瑞霞, 孙玉宝

(1.河北工业大学 天津市电子材料与器件重点实验室, 天津 300401;

2.河北工业大学 应用物理系, 天津 300401)

摘要: 聚合物稳定蓝相液晶显示器存在驱动电压高和“磁滞效应”的缺点, 是其应用之路上的难题。本文在深入研究蓝相液晶显示器中所使用的各种材料介电常数的基础上, 结合电动力学中电介质中的电场和电位移之间关系的知识, 解释了蓝相液晶显示器驱动电压高的原因为聚合物材料和绝缘层材料的介电常数远低于蓝相液晶材料的介电常数。研究中发现提高聚合物材料和绝缘层材料的介电常数, 将会明显降低聚合物蓝相液晶显示器驱动电压。理论和模拟结果表明: 当聚合物材料和绝缘层的介电常数达到蓝相液晶的平均介电常数, 该聚合物稳定蓝相液晶显示器的驱动电压降低一半。研究结果将对聚合物稳定蓝相液晶显示器的产业化应用起到促进作用。

关键词: 蓝相液晶显示器; 高介电材料; 驱动电压; 磁滞效应

中图分类号: TN141.9 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/YJYXS20173203.0163

A method to reduce the operating voltage of polymer stabilized blue-phase liquid crystal displays

MA Hong-mei*, YANG Rui-xia, SUN Yu-bao

(1. *Tianjin Key Laboratory of Electronic Materials and Devices,
Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China;*

2. *Department of Applied Physics, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China*)

Abstract: Polymer stabilized blue phase liquid crystal display (PS-BPLCD) is difficult to be used in production because of its high operating voltage and hysteresis effect. In this paper, we analyzed the reason of the high operating voltage of BPLCD based on the relationship between the electric field and electric displacement in electrodynamics and the dielectric constants of every material used in BPLCD. The reason is that the dielectric constant of polymer and insulator layer's material is far less than that of blue phase liquid crystal. The operating voltage of PS-BPLCD can be obviously reduced by

收稿日期: 2016-08-12; **修订日期:** 2016-09-11.

基金项目: 国家自然科学基金(No.11304074; 61475042); 河北省自然科学基金(No.2015202320); 河北省教育厅高层次人才项目(No.GCC2014048)

Supported by National Natural Science Foundation of China (No.11304074; 61475042); Natural Science Foundation of Hebei Province(No.2015202320); High-Level Talent Project of Education Department of Hebei Province(No.GCC2014048)

* 通信联系人, E-mail: mhmtj@163.com

increasing the dielectric constant of polymer and insulator layer's material. The results show that the operating voltage is reduced to the half when the dielectric constants of polymer and insulator layer's material reach the average dielectric constant of liquid crystal. These results have promotion effect in the industrialization of PS-BPLCD.

Key words: blue phase liquid crystal display; high dielectric material; operating voltage; hysteresis effect

1 引言

自 2008 年三星公司展出蓝相液晶显示器的样机^[1]之后,蓝相液晶显示器的研究热度一度持续至今。在此期间,人们发明新型蓝相液晶材料和手性剂材料,新的聚合物材料等^[2-6]来让蓝相液晶结构更稳定,并提高蓝相液晶的克尔常数;提出共面电极结构,双面共面电极结构,凸起电极结构,墙状电极结构,垂直电场驱动等^[7-15]来驱动 PS-BPLCD,并逐渐降低驱动电压。尽管人们的研究获得了很多有价值的结果,但依然没有使蓝相液晶显示器进入到产业化的阶段,其主要原因是:(1)驱动电压高,一般传统共面电极结构的驱动电压为 100 V 以上,这个电压超过 TFT 驱动能力^[7-8],新的电极结构虽然能够将驱动电压降到适应 TFT 驱动能力,但电极结构很难做或者与现有 TFT-LCD 生产工艺不相符,产业化需要增加新的工艺和设备^[9-12];(2)磁滞效应难消除,驱动电场强度依然与蓝相液晶材料的饱和电场强度相差不多或者更大,因此依然会导致有“磁滞效应”^[6,13-15];(3)制造工艺难,在获得低驱动电压的方法中,凸起电极结构是最有效的方法,制作凸起结构也不是太难,但在其表面制作 ITO 电极,并且保证很高的导电性能则很难;(4)蓝相液晶的稳定性,现在一般采用高介电各向异性的液晶材料来降低驱动电压,但带来的副作用就是液晶材料的稳定性较差^[17]。

人们采用改进液晶材料来研究获得降低蓝相液晶显示器的驱动电压,主要包含以下几种方法:(1)提高液晶材料的体积比,从最初的约为 50% 提高到现在的接近 90%^[7,17],高的液晶材料体积比能够有更多的液晶提供双折射效应,从而降低驱动电压;(2)在蓝相液晶的结构稳定方面,使用铁电性纳米微粒替代聚合物网络进行稳定,同时驱动电压也能下降约 30%^[18];(3)提高液晶的介

电各向异性来降低驱动电压,其原因是驱动电压正比于介电各向异性平方根的倒数,目前介电各向异性已经达到 400 的数值来看,再提高的难度很高,同时实验中看到介电常数的提高并不能够将驱动电压降低很多^[17]。

人们在研究聚合物稳定蓝相液晶显示器时,都是在设计新型电极结构,或者研究新的聚合物单体材料和新的光聚合方法,以及提高液晶材料的介电各向异性和双折射率,来获得降低驱动电压的方法。本文中,我们从一个特别的方向来研究降低驱动电压的方法,采用电介质中的电场与电位移之间的关系来研究普通 PS-BPLCD 驱动电压高的原因,然后研究提高聚合物材料和绝缘层材料的介电常数,来研究高介电常数对 PS-BPLCD 驱动电压的影响,通过软件模拟计算高介电常数材料在降低蓝相液晶显示器驱动电压中的作用。

2 理论基础

在普通液晶显示器中,驱动电极和液晶之间存在着绝缘层,该绝缘层可以使通过液晶层的电流降到很低,从而起到保护液晶不受注入电荷的影响,进而能够使液晶显示器的使用寿命很长。如图 1 所示,液晶在两个驱动电极之间,由绝缘性材料隔开,绝缘材料通常为二氧化硅或者氮化硅材料,其介电常数(ϵ_{ins})通常为 4.0 以下,厚度一般为 0.1~0.3 μm ,液晶层的厚度一般为几个微米,蓝相液晶层厚度较大,一般选择为 10 μm ,液晶材料的介电常数,按照现在常用蓝相液晶的介电各向异性(>90)来大概给出^[4,6-8]。因为在未加电压的情况下,蓝相液晶表现为各向同性的材料,因此其介电常数为常数,与液晶的介电常数之间的关系可以写为: $\bar{\epsilon} = \epsilon_{\perp} + \frac{1}{3}\Delta\epsilon$,蓝相液晶材料的 $\epsilon_{\perp}$ 通常为 10 以上,因此平均介电常数约为

40^[8]。在 PS-BPLCD 中还有用于稳定蓝相液晶结构的聚合物材料、获得螺旋结构的手性剂材料和增加光聚合作用光诱发剂,它们的总含量至少为 10%,换算为厚度比也约为 10%(因为它们与液晶的密度相差不大),它们的介电常数也均为 4.0 左右^[2-6,17]。

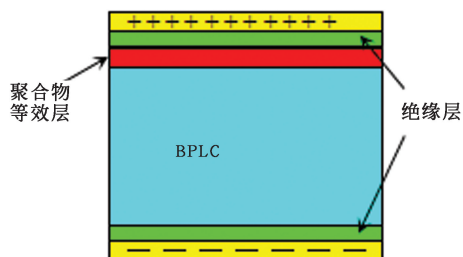


图1 蓝相液晶显示器的简化模型

Fig.1 Simple model of blue phase liquid crystal display

为理论分析的方便性,假设液晶层的介电常数始终为常数(实际为:加电压后,液晶分子向着电场方向排列,因为平行于液晶分子长轴的介电常数比垂直液晶分子长轴的介电常数大很多,所以表现的介电常数会更大^[7-8])。因为电极间存在绝缘层,所以电极间可以认为存在很小的电流,电子从负极向正极流动,存在电位移,在简化模型中,电位移矢量只在电极间的方向有值,且为常数,根据电动力学中电介质中的电场与电位移之间的关系^[19],可以知道在绝缘层和蓝相液晶中的电位移分别为:

$$D_{\text{BPLC}} = \epsilon E_{\text{BPLC}}, D_{\text{ins}} = \epsilon_{\text{ins}} E_{\text{ins}}, \quad (1)$$

其中: E_{BPLC} 和 E_{ins} 分别为蓝相液晶和绝缘层中的电场强度。因为电极间的电位移值只能为一个常数,即 $D_{\text{BPLC}} = D_{\text{ins}}$,所以在绝缘层和蓝相液晶中的电场强度的比值为它们的介电常数比值的倒数,即为:

$$E_{\text{BPLC}}/E_{\text{ins}} = \epsilon_{\text{ins}}/\epsilon, \quad (2)$$

从上面给所给的参数可知:蓝相液晶中的电场强度约为绝缘层或者聚合物材料中的十分之一。在电极上施加某电压情况下,施加在蓝相液晶、绝缘层和聚合物等效层上电压比为

$$\frac{U_{\text{LC}}}{U_{\text{Other}}} = \frac{E_{\text{BPLC}} \cdot d_{\text{BPLC}}}{E_{\text{ins}} \cdot (d_{\text{ins}} + d_{\text{eff}})} = \frac{\epsilon_{\text{ins}} \cdot d_{\text{BPLC}}}{\epsilon \cdot (d_{\text{ins}} + d_{\text{eff}})}, \quad (3)$$

代入以上的典型数值($d_{\text{BPLC}} = 9 \mu\text{m}$, $d_{\text{eff}} =$

$1 \mu\text{m}$, $d_{\text{ins}} = 0.2 \mu\text{m}$, $\bar{\epsilon} = 40$ 和 $\epsilon_{\text{ins}} = 4.0$),可以得到:真正施加在蓝相液晶上的电压要小于加在绝缘层和聚合物上的电压。也就是说真正起作用的电压值不到加在电极上电压值的一半,其它都在绝缘层和聚合物网络中消耗,当蓝相液晶在电场作用下重新排列后,蓝相液晶在电场方向的介电常数会增大,从而在蓝相液晶上的电压比例就会更小,这就是蓝相液晶显示器驱动电压高的一个重要原因。当绝缘层、聚合物材料和蓝相液晶的介电常数相同时,则电压比即为厚度比;当绝缘层和聚合物材料的介电常数比蓝相液晶的介电常数大很多的时候,则蓝相液晶层的电压约为在电极上施加的电压。

应用式(3),可以计算出绝缘层的介电常数对蓝相液晶显示器驱动电压的具体影响。在简化模型中,施加在电极之间的电势差为液晶上的电压和其它部分电压之和,计算中所采用的参数为: $d_{\text{BPLC}} = 10 \mu\text{m}$, $d_{\text{ins}} + d_{\text{eff}} = 1 \mu\text{m}$,蓝相液晶的介电常数固定为 40,其它部分定义为绝缘层。图 2 给出施加在蓝相液晶上的电压与电极之间的电势差的比值与绝缘层和聚合物等效层的介电常数之间的关系。由图中可以看到:当绝缘层的介电常数为 4.0 时,加在液晶上的电压为在电极上施加电压的一半;当绝缘层的介电常数为 40 时,加在液晶上的电压约为电极上施加电压的 91%,当加在液晶上的电压固定时,加在电极上的电压下降 45%;当介电常数超过 100,比值超过 95%,但是从驱动电压的降低幅度来说就很小了。

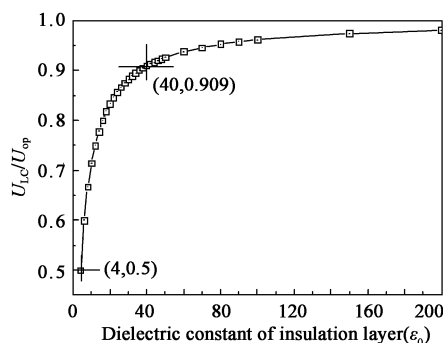


图2 施加在液晶的电压和施加在电极上驱动电压的比值与绝缘层介电常数的关系

Fig.2 Relationship of the dielectric constant of insulation layer and the ratio of the voltages applied on liquid crystal layer and electrodes

3 模拟计算

模拟计算中,使用韩国 Sanayi 公司的 TechWiz LCD 3D 模拟软件对共面电极和墙状电极结构驱动的蓝相液晶显示器进行模拟。为了将蓝相液晶材料中的聚合物材料等表现出来,在电极表面设置厚度为二十分之一电极间隙的绝缘层(因为两个电极表面都有绝缘层,所以厚度的十分之一为绝缘层),如图 3 所示。模拟中使用的蓝相液晶显示器参数为:液晶层厚度 d 设置为 $10\ \mu\text{m}$,电极宽度和间隙为 $5\ \mu\text{m}$ 和 $10\ \mu\text{m}$,电极长方向为垂直于纸面,电极厚度为 $0.1\ \mu\text{m}$;蓝相液晶的参数为: $\epsilon_{\perp}=18$, $\epsilon_{\parallel}=112$ 和 $\Delta\epsilon=94$,饱和双折射率和饱和电场强度分别为 $0.13(550\ \text{nm})$ 和 $4.3\ \text{V}/\mu\text{m}^{[20]}$,虽然饱和双折射率和饱和电场强度为蓝相液晶材料和聚合物材料等混合材料的实验测量结果,为蓝相液晶和聚合物等混合材料的整体表现,但是不失理论的合理性,也可以单独作为蓝相液晶的独立参数;偏光片的参数为: $n_e=n_o=1.5$,其虚部为 $K_e=1.929\times 10^{-3}$, $K_o=4.535\times 10^{-5}$,虚部为光通过偏光片时在不同方向的吸收系数,厚度为 $230\ \mu\text{m}$,两个偏光片的透光轴角度为 $\pm 45^\circ$ 。

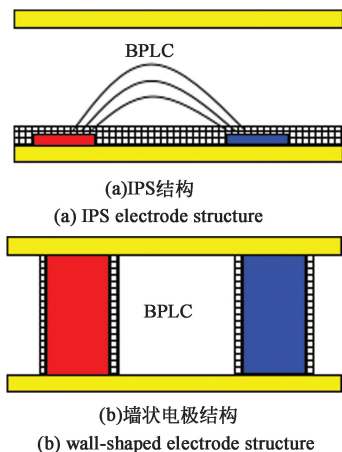
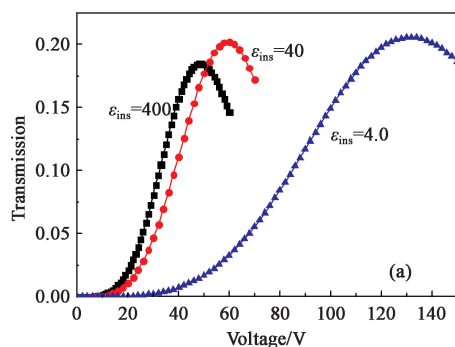


图 3 IPS 电极和墙状电极结构的蓝相液晶显示器示意图

Fig.3 Schematic diagram of IPS and Wall-electrodes BPLCD

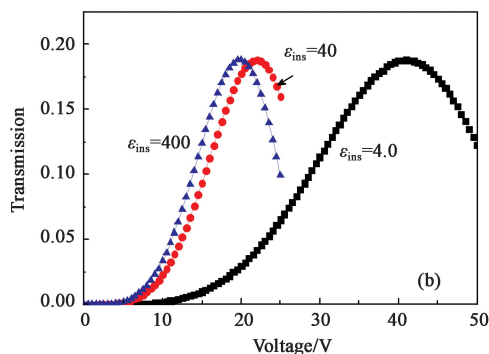
首先,绝缘层的介电常数取为 4.0,40 和 400,计算得到的电光曲线结果如图 4 所示。从图中可以看到:当绝缘层的介电常数为 4.0 时,最大透过率对应的驱动电压都很高,而当绝缘层的介电常

数为 40 时,驱动电压降低一半多,继续增大绝缘层的介电常数,驱动电压降低的幅度就不大了。



(a) IPS 电极结构

(a) IPS electrodes structure



(b) 墙状电极结构

(b) Wall-shaped electrodes structure

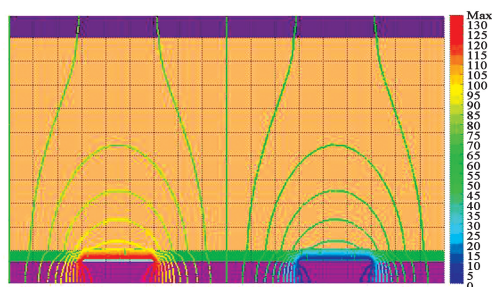
图 4 蓝相液晶显示器的电光曲线

Fig.4 Voltage-dependent transmission of blue-phase liquid crystal display

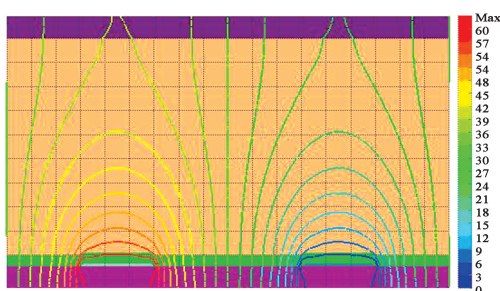
为了更清晰地看到驱动电压下降的原因,在图 5 和图 6 中给出蓝相液晶显示器中电势分布图,为了清晰地看到电压降效果,我们只给出绝缘层介电常数为 4.0 和 40 两种情况下的电势分布图。从图 5 和图 6 中可以看到:当绝缘层介电常数为 4.0 时,在绝缘层中的电势线密度远大于蓝相液晶中的电势线密度,说明在绝缘层中的电压降很大;当绝缘层介电常数为 40 时,绝缘层和蓝相液晶中的电势线密度几乎相同,因此在绝缘层中的电压降很小。

对比图 5 和 6 中的(a)和(b),当绝缘层的介电常数小的时候,在电极的边缘处有密集的电势线分布,根据 $E = -\nabla U$,则表明此位置的电场强度很高,这也是在蓝相液晶显示器中出现“磁滞效应”的重要因素^[21];当绝缘层介电常数与蓝相液

晶的平均介电常数相等时,则在电极边缘处的电势线密度要小很多,因此此处的电场强度也小很多,可以有效地降低“磁滞效应”。



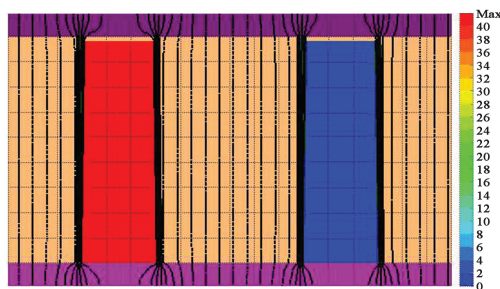
(a) $\epsilon_{\text{ins}} = 4.0$



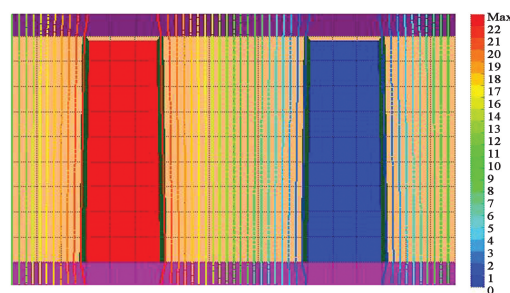
(b) $\epsilon_{\text{ins}} = 40$

图5 IPS电极结构蓝相液晶显示器中电势分布

Fig. 5 Potential distribution of blue-phase liquid crystal display with IPS electrode



(a) $\epsilon_{\text{ins}} = 4.0$



(b) $\epsilon_{\text{ins}} = 40$

图6 墙状电极结构蓝相液晶显示器中电势分布

Fig. 6 Potential distribution of blue-phase liquid crystal display with wall-shaped electrode

4 结 论

我们研究了聚合物稳定蓝相液晶显示器中绝缘层和聚合物材料等材料的介电常数对蓝相液晶显示器驱动电压的影响。在现在蓝相液晶显示器中使用的绝缘层材料、聚合物材料、手性剂和光诱发剂等材料,它们的介电常数通常都比较小,简单模型分析表明分在低介电常数的膜层中的电压大于蓝相液晶中的分压,从而导致聚合物稳定蓝相液晶显示器驱动电压较高;当提高绝缘层和聚合物材料的介电常数到蓝相液晶的平均介电常数后,理论和模拟计算结果表明加在电极上的驱动电压可以下降一半多,从而可以实现降低 PS-BPLCD 驱动电压的目的。当在 PS-BPLCD 的结构不变的情况下,通过提高绝缘层和聚合物材料的介电常数有效地降低 PS-BPLCD 的驱动电压后,由电极形状而产生很大电场强度的位置消失,从而可以有效地降低“磁滞效应”。本文研究结果对聚合物稳定蓝相液晶显示器发展有指导意义。

参 考 文 献:

- [1] LEE H, PARK H J, KWON O J, *et al.* The world's first blue phase liquid crystal display [J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2011, 42(1): 121-124.
- [2] KIKUCHI H, YOKOTA M, HISAKADO Y, *et al.* Polymer-stabilized liquid crystal blue phases [J]. *Nature Materials*, 2002, 1(1): 64-68.
- [3] HASEBA Y, KIKUCHI H, NAGAMURA T, *et al.* Large electro-optic Kerr effect in nanostructured chiral liquid-crystal composites over a wide temperature range [J]. *Advanced Materials*, 2005, 17(19): 2311-2315.
- [4] XU D M, YUAN J M, SCHADT M, *et al.* Blue phase liquid crystals stabilized by linear photo-polymerization [J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 105(8): 081114.

- [5] HEW L, PAN G H, YANG Z, *et al.* Wide blue phase range in a hydrogen-bonded self-assembled complex of chiral fluoro-substituted benzoic acid and pyridine derivative [J]. *Advanced Materials*, 2009, 21(20): 2050-2053.
- [6] LIU Y F, XU S, XU D M, *et al.* A hysteresis-free polymer-stabilised blue-phase liquid crystal [J]. *Liquid Crystals*, 2014, 41(9): 1339-1344.
- [7] GE Z B, GAUZA S, JIAO M Z, *et al.* Electro-optics of polymer-stabilized blue phase liquid crystal displays [J]. *Applied Physics Letters*, 2009, 94(10): 101104.
- [8] GE Z B, RAO L H, GAUZA S, *et al.* Modeling of blue phase liquid crystal displays [J]. *Journal of Display Technology*, 2009, 5(7): 250-256.
- [9] CHEN Y Q, SUN Y B, YANG G Q. Low voltage and high transmittance blue-phase LCDs with double-side in-plane switching electrodes [J]. *Liquid Crystals*, 2011, 38(5): 555-559.
- [10] CHEN C P, SU Y K, CHEN Y Q, *et al.* Ultra-high transmittance blue phase LCD with double in-plane switching electrodes [J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2012, 43(1): 1389-1392.
- [11] RAO L H, GE Z B, WU S T, *et al.* Low voltage blue-phase liquid crystal displays [J]. *Applied Physics Letters*, 2009, 95(23): 231101.
- [12] YOON S, KIM M, KIM M S, *et al.* Optimisation of electrode structure to improve the electro-optic characteristics of liquid crystal display based on the Kerr effect [J]. *Liquid Crystals*, 2010, 37(2): 201-208.
- [13] FAN H X, CUI J P, WANG Q H. High transmittance blue-phase liquid crystal display with improved protrusion electrodes [J]. *Liquid Crystals*, 2015, 42(4): 481-485.
- [14] KIM M, KIM M S, KANG B G, *et al.* Wall-shaped electrodes for reducing the operation voltage of polymer-stabilized blue phase liquid crystal displays [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2009, 42(23): 235502.
- [15] CHENG H C, YAN J, ISHINABE T, *et al.* Vertical field switching for blue-phase liquid crystal devices [J]. *Applied Physics Letters*, 2011, 98(26): 261102.
- [16] SUN Y B, ZHAO Y L, LI Y F, *et al.* A low operating electric field blue-phase liquid crystal display with wedge protrusion [J]. *Journal of Display Technology*, 2014, 10(9): 797-801.
- [17] CHEN Y, YAN J, SUN J, *et al.* A microsecond-response polymer-stabilized blue phase liquid crystal [J]. *Applied Physics Letters*, 2011, 99(20): 201105.
- [18] WANG L, HE W L, XIAO X, *et al.* Hysteresis-free blue phase liquid-crystal-stabilized by ZnS nanoparticles [J]. *Small*, 2012, 8(14): 2189-2193.
- [19] 俎栋林.电动力学[M].北京:清华大学出版社,2006:9-11.
ZU D L. *Electrodynamics* [M]. Beijing: Tsinghua University Publishing House, 2006: 9-11. (in Chinese)
- [20] 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.
- [21] RAO L H, YAN J, WU S T, *et al.* Critical field for a hysteresis-free BPLC device [J]. *Journal of Display Technology*, 2011, 7(12): 627-629.

作者简介:马红梅(1975—),女,河北邢台人,副教授,从事液晶器件物理方面的研究。E-mail: mhmtj@163.com