

文章编号:1007-2780(2019)09-0835-06

模板化蓝相液晶多波长滤波器

查升毫,孙长俐,冯一凡,陆建钢*

(上海交通大学 电子工程系,上海 200240)

摘要:胆甾相液晶被广泛应用于光学滤波器中,但是其带宽较宽,无法应用于窄带宽滤波器。而蓝相液晶滤波器反射带宽窄,且其在聚合前后以及模板化重构前后稳定性非常好。因此,本文研究模板化单畴蓝相液晶的制成与光特性,通过多模板集成,可以实现多波长窄带滤波器的灵活制备。实验结果表明:单畴蓝相液晶的中心反射波长的半高宽约为 35 nm,比胆甾相液晶的反射带宽要窄得多,并且模板化过程中心波长与带宽基本保持不变。且当入射角变化时,模板化蓝相液晶滤波器的中心波长偏移也远小于胆甾相液晶滤波器。用这种方法实现的滤波器具有很高的稳定性和可重复性。

关键词:蓝相液晶;滤波器;聚合物模板;反射带宽

中图分类号:O753+.2 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/YJYXS20193409.0835

Multi-wavelength filters of templated blue phase liquid crystal

ZHA Sheng-hao, SUN Chang-li, FENG Yi-fan, LU Jian-gang*

(*Department of Electronic Engineering, Shanghai Jiao Tong University,
Shanghai 200240, China*)

Abstract: Cholesteric liquid crystals (CLCs) are widely used in optical filters, but their bandwidth is too wide to be used in narrow bandwidth filters. The reflection bandwidth of blue phase liquid crystal (BPLC) filter is narrower than that of CLCs and the filter shows good stability before and after polymerization and templated process. Therefore, the fabrication and optical properties of templated mono-domain blue phase liquid crystals are investigated in this paper. By multi-template integration, the flexible fabrication of narrowband multi-wavelength filters can be achieved. The experimental results show that the full width at half maximum (FWHM) of the central reflection wavelength of mono-domain blue-phase liquid crystals is about 35 nm, which is much narrower than that of cholesteric liquid crystals, and the central wavelength would not shift during the template process, and the corresponding bandwidth remains unchanged. While the incident angle changes, the shift of center wavelength of the template blue-phase liquid crystal filter is much smaller than that of the cholesteric liquid crystal filter. The filter realized by this method exhibits high stability and repeatability.

Key words: blue phase liquid crystal; filters; polymer template; reflection bandwidth

收稿日期:2019-04-08;修订日期:2019-05-07.

基金项目:国家自然科学基金(No.61775135)

Supported by National Natural Science Foundation of China(No.61775135)

* 通信联系人, E-mail: lujg@sjtu.edu.cn

1 引言

近年来,液晶光学滤波器被广泛应用于各种光通信与显示领域,如法布里-佩罗(Fabry-Perot)滤波器^[1-2]、薄膜滤波器^[3]、波导滤波器^[4]、马赫-森德干涉仪滤波器^[5]以及胆甾相液晶滤波器等。在这些滤波器中由于胆甾相液晶独特的螺旋结构所产生的布拉格反射,并且其中心波长很容易随温度和电压调节,而被广泛地应用于各种滤波器之中^[6-10]。2012年,黄玉华研究小组提出了一种基于热效应的宽带可调滤波器^[11]。Tondiglia提出了一种聚合物稳定胆甾相液晶的电致宽带滤波器^[12]。然而,胆甾相液晶滤波器的带宽太宽,无法应用到窄带滤波器中,且集成式胆甾相液晶滤波器件制作工艺复杂,模板化胆甾相液晶的重构过程会导致中心波长的偏移^[13-15]。

液晶蓝相态介于各向同性态和胆甾相之间,其自然态温度范围非常狭窄,一般只有1~2℃左右,但是模板化蓝相液晶具有非常好的热稳定性。本文提出一种可见光波段中基于模板化蓝相液晶的窄带宽多波长滤波器,可以实现无中间介质层的多层模板化蓝相液晶器件,可以同时反射多个波长。相比于胆甾相液晶滤波器,模板化蓝相液晶滤波器的反射带宽更窄,其中心波长和带宽更稳定,且该滤波器的中心波长与带宽可以通过不同模板的组合和材料比例的优化任意调节。

2 材料与实验设计

2.1 材料准备

为了获得模板化蓝相液晶,实验所需材料系统包括以下成分:正性向列相液晶HBG98(江苏和成)、手性剂(R5011,江苏和成)、交联剂(C3M,江苏和成)、单体(TMPTA,江苏和成)和光引发剂(IRG184,江苏和成)。通过调节手性剂的比例可以获得反射不同波长的模板化蓝相液晶。为了实现多波长蓝相液晶滤波器件,本文设计了3种手性剂掺杂浓度的材料体系,可分别实现反射波长为红、绿、蓝3色的聚合物稳定蓝相液晶与模板化蓝相液晶,其材料配比(质量分数)如表1所示。

表1 聚合物稳定蓝相液晶材料配比

Tab.1 Material mixture ratio of PS-BPLCs (%)

	HBG98	R5011	C3M	TMPTA	IRG184
Red	84.77	3.13	7	5	0.1
Green	84.48	3.42	7	5	0.1
Blue	84.3	3.6	7	5	0.1

2.2 实验设计

为了对比聚合物稳定蓝相液晶与模板化蓝相液晶的光谱特性,我们需要制备聚合物稳定蓝相液晶。首先将表1中的材料在恒温磁力搅拌器(524G,上海梅氏仪器)上搅拌约10 min,当材料出现清亮透明的液体时,说明材料已经充分搅拌均匀,这样我们就获得了聚合物稳定蓝相液晶前驱体。然后将搅拌均匀的蓝相液晶前驱体在温度控制器(HCS302, Instec Co.)上(温度控制在各向同性态)通过毛细管灌入带有配向处理的液晶盒中。然后开始降温观察相态变化,确定蓝相温度。最后通过紫外曝光(波长:365 nm,曝光时间:8 min,曝光强度:3 mW/cm²)制备出聚合物稳定蓝相液晶。

将内含聚合物稳定蓝相液晶的器件上下基板分离,聚合物稳定蓝相液晶会附着在其中一块玻璃基板上。将其放在乙醇中浸泡10 min左右,洗去液晶、手性试剂、未交联单体和光引发剂等残留物质,再放置在温度控制器上5 min,温度保持50℃,确保乙醇充分挥发,最后将聚合物层与玻璃基板剥离,即可得到聚合物模板。

为了分析蓝相液晶的光谱特性,利用图1的装置进行测量。如图所示,白光光源信号正入射到模板上,透过模板和玻璃基板的光信号由连接

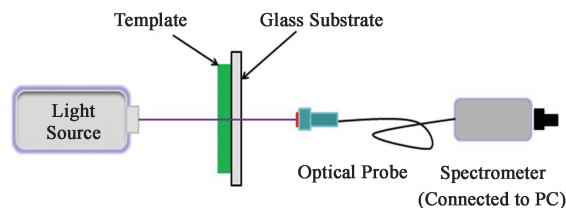


图1 蓝相液晶反射光谱测量装置

Fig.1 Measurement setup for transmission spectrum of BPLC

到光谱仪的光纤探头接收,在电脑端通过软件控制就能获得光谱图。

3 结果与分析

3.1 多畴与单畴蓝相液晶的光谱分析

由于初始状态的不同,蓝相液晶通常具有多畴结构。这就导致其有一定的散射特性,反射波长的带宽相对较宽。为了获得窄带宽蓝相液晶器件,可以采用单晶蓝相液晶或单畴蓝相液晶的方法。由于单晶的制备过程复杂且稳定性较差,本实验采用表面取向法^[16]诱导单畴蓝相液晶。

如图2所示,液晶盒的玻璃基板通过配向处理,可以诱导出单畴特性较好的蓝相液晶。单畴蓝相液晶的反射光谱的半高宽约为30 nm,相比于多畴蓝相液晶的半高宽(约90 nm)要窄得多,可用于实现窄带滤波器件。因此,本实验中我们使用的都是表面取向法诱导的单畴蓝相液晶器件。

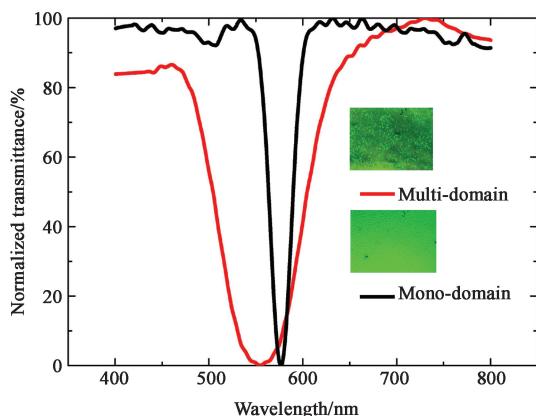


图2 单畴和多畴蓝相液晶的归一化反射光谱图

Fig.2 Normalized spectra of multi-domain BPLC and mono-domain BPLC

3.2 聚合物稳定单畴蓝相液晶与模板化单畴蓝相液晶的光谱特性分析

在表1所示的不同手性试剂浓度下,本文制备了反射波长分别为红色、绿色以及蓝色的聚合物稳定单畴蓝相液晶和模板化单畴蓝相液晶。并利用图1所示的测量系统测量了其反射光谱。对应的反射光谱图如图3所示。蓝、绿、红3色的聚合物稳定蓝相液晶的反射峰分别为447,577,658 nm,其中反射波形的半高宽分别为34 nm(蓝

色)、34 nm(绿色)和35 nm(红色)。在聚合物模板上重新灌入非手性液晶HBG98,可重构蓝相液晶,重新测量,模板化蓝相液晶的反射峰分别为444 nm(蓝色)、572 nm(绿色)和654 nm(红色)。模板化蓝相液晶反射波形的半高宽分别为37 nm(蓝色)、36 nm(绿色)和35 nm(红色)。如图3所示,模板蓝相液晶的中心反射波长和反射波形的半高宽在模板化过程前后几乎没有变化。因此,模板化的单畴蓝相液晶具有良好的重复性和过程稳定性。

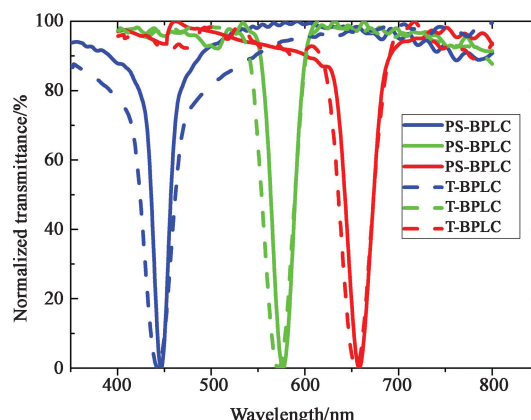


图3 红、绿、蓝3种颜色的聚合物稳定蓝相液晶和模板化蓝相液晶的归一化反射光谱对比图。

Fig.3 Normalized reflection spectra of PS-BPLCs and transmission spectra of template BPLCs for blue, green, and red colors, respectively

3.3 模板化单畴蓝相液晶的角度特性分析

为了研究入射光的角度对单畴蓝相液晶的中心波长的影响,实验中在不同入射角的情况下测量了模板化单畴蓝相液晶的中心波长的变化。图4展示了绿光波段模板化单畴蓝相液晶与胆甾相液晶的中心波长随入射角变化的光谱图。当入射角度为 0° 时,模板化单畴蓝相液晶的中心波长为574 nm。随着入射角度的增大,其中心波长发生蓝移。当入射角达到 60° 时,中心波长偏移到了496 nm,偏移量为78 nm。当入射角度为 0° 时,胆甾相液晶的中心波长为582 nm。随着入射角度的增大,其中心波长同样发生蓝移。当入射角达到 60° 时,中心波长偏移到了462 nm,偏移量为120 nm。由此可见,蓝相液晶器件受入射光角度变化的影响远小于胆甾相液晶,其中心波长的角度稳定性更好。

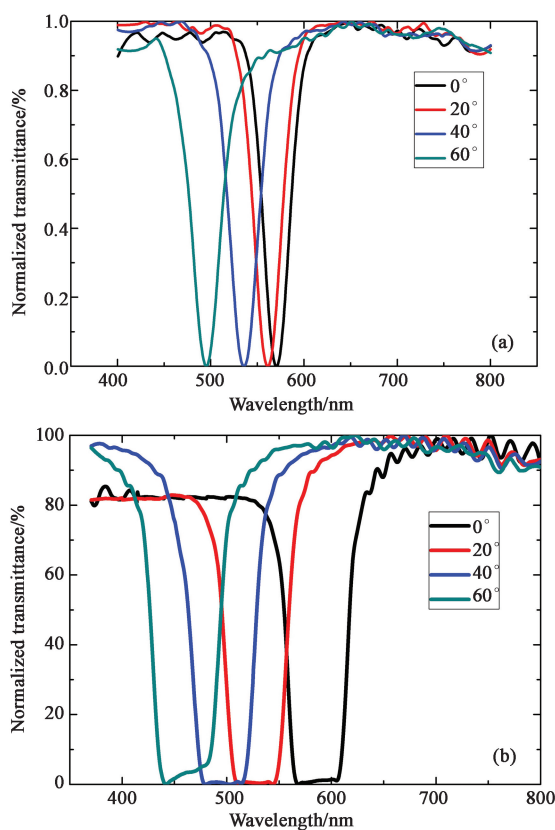


图 4 不同入射角度下单畴蓝相液晶(a)与胆甾相液晶(b)中心波长的变化

Fig.4 Central wavelength variation of mono-domain BPLC (a) and CLC (b) at different incident angles

3.4 多层模板化蓝相液晶滤波器的制备与特性分析

将制备好的红绿蓝三色单层聚合物模板两两或三层同时压合,集成在玻璃基板上,再将非手性液晶 HBG98 注入其中,可以实现红/绿、红/蓝、绿/蓝、红/绿/蓝 4 种多波长滤波器。如图 5 所示,红/绿滤波器的反射峰分别为 574 nm 和 649 nm,其半

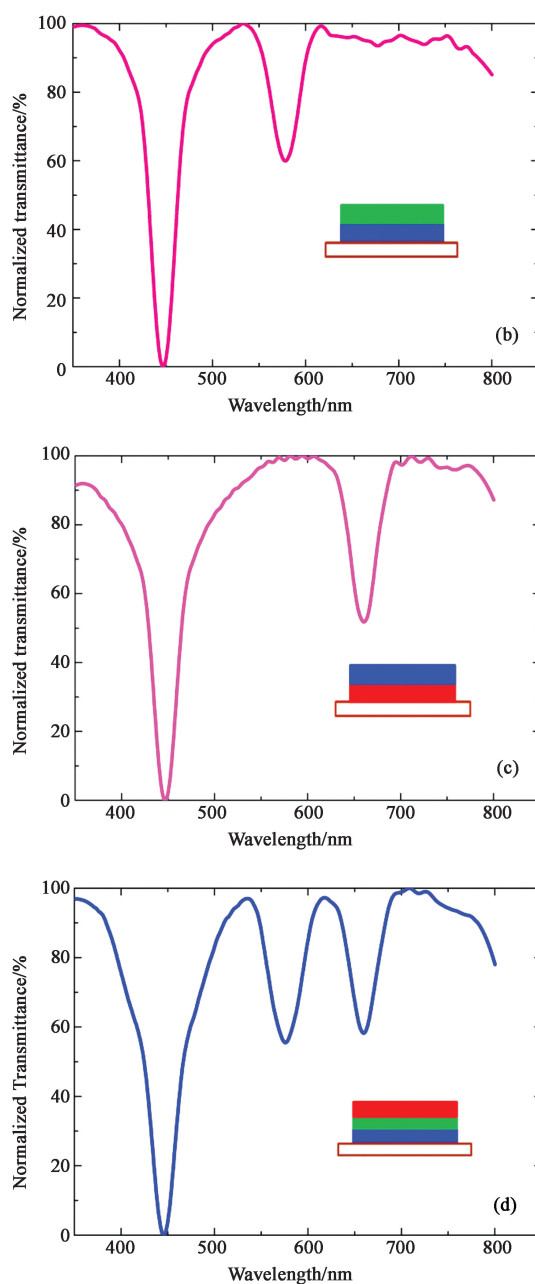
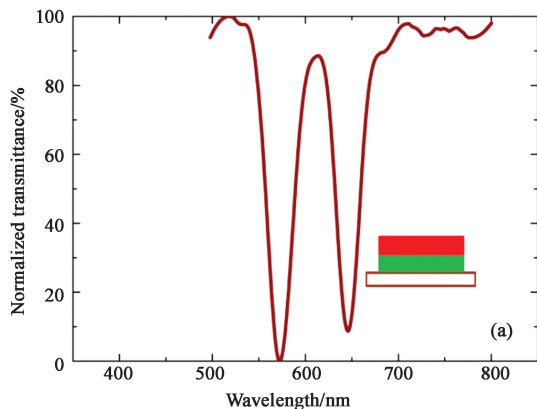


图 5 红绿滤波器(a)、蓝绿滤波器(b)、红蓝滤波器(c)、和红绿蓝滤波器(d)的透射光谱图。

Fig.5 Normalized transmittance spectra of red/green filter(a), blue/green filter(b), blue/red filter (c), and red/green/blue filter(d) with multi-layer template BPLC, respectively.

高宽分别为 33 nm 和 34 nm。蓝/绿滤光片的反射峰分别为 450 nm 和 575 nm,其半峰宽分别为 34 nm 和 35 nm。蓝/红滤光片的反射峰分别为 450 nm 和 653 nm,半高宽分别为 33 nm 和 35 nm。红/绿/蓝滤光片的反射峰分别为 448, 577,

657 nm,其半高宽分别为 34,35,34 nm。无论是双层模板还是三层模板的蓝相液晶滤波器,我们发现蓝色的反射强度都比绿色和红色的反射强度高,这是因为蓝色的螺旋间距要比绿色和红色的螺旋间距短。与单层模板的蓝相液晶滤波器相比,多层模板蓝相液晶滤波器的反射峰和半高宽基本保持不变,最大反射峰偏移量仅为 8 nm,最大半高宽变化量仅为 4 nm。这表明利用该方法制备的多层模板集成滤波器件可以实现窄带宽和多反射峰,反射峰波长可以通过制备时的手性剂比例自由调节,反射峰的个数可由模板的数量决定。且该工艺具有良好的重复性和稳定性。

4 结 论

与胆甾相液晶滤波器相比,蓝相液晶滤波器的反射带宽更窄,半高宽最窄可达 35 nm,其波长和带宽随温度的变化会更加稳定,并且模板化过程中心波长基本不偏移,对应的带宽也保持不变。用这种方法实现的滤波器具有很高的稳定性和可重复性。当入射角变化时,蓝相液晶的中心波长的偏移量要远小于胆甾相液晶。液晶模板化蓝相液晶多波长滤波器在彩色滤光片和高密度波分复用网络中具有潜在的应用前景。

参 考 文 献:

- [1] PARK N, DAWSON J W, VAHALA K J. All fiber, low threshold, widely tunable single-frequency, erbium-doped fiber ring laser with a tandem fiber Fabry-Perot filter [J]. *Applied Physics Letters*, 1991, 59(19): 2369-2371.
- [2] KERSEY A D, BERKOFF T A, MOREY W W. Multiplexed fiber Bragg grating strain-sensor system with a fiber Fabry-Perot wavelength filter [J]. *Optics Letters*, 1993, 18(16): 1370-1372.
- [3] MACLEOD H A. Turning value monitoring of narrow-band all-dielectric thin-film optical filters [J]. *Optica Acta: International Journal of Optics*, 1972, 19(1): 1-28.
- [4] ATIA A E, WILLIAMS A E. Narrow-bandpass waveguide filters [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1972, 20(4): 258-265.
- [5] MORA J, ORTEGA B, DÍEZ A, et al. Photonic microwave tunable single-bandpass filter based on a Mach-Zehnder interferometer [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2006, 24(7): 2500-2509.
- [6] MITOV M. Cholesteric liquid crystals with a broad light reflection band [J]. *Advanced Materials*, 2012, 24(47): 6260-6276.
- [7] LAVERNHE A, MITOV M, BINET C, et al. How to broaden the light reflection band in cholesteric liquid crystals? A new approach based on polymorphism [J]. *Liquid Crystals*, 2001, 28(5): 803-807.
- [8] BINET C, MITOV M, BOUDET A. Bragg reflections in cholesteric liquid crystals: from selectivity to broadening and reciprocally [J]. *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, 2000, 399(1): 111-123.
- [9] BOUDET A, BINET C, MITOV M, et al. Microstructure of variable pitch cholesteric films and its relationship with the optical properties [J]. *The European Physical Journal E*, 2000, 2(3): 247-253.
- [10] MITOV M, BINET C, BOUDET A, et al. Glassy cholesteric broadband reflectors with a pitch gradient: material design, optical properties and microstructure [J]. *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, 2001, 358(1): 209-223.
- [11] HUANG Y H, ZHANG S C. Widely tunable optical filter with variable bandwidth based on the thermal effect on cholesteric liquid crystals [J]. *Applied Optics*, 2012, 51(24): 5780-5784.
- [12] TONDIGLIA V T, NATARAJAN L V, BAILEY C A, et al. Electrically induced bandwidth broadening in polymer stabilized cholesteric liquid crystals [J]. *Journal of Applied Physics*, 2011, 110(5): 053109.
- [13] HE Z H, YE Z C, CUI Q Y, et al. Reflection chromaticity of cholesteric liquid crystals with sandwiched periodical isotropic defect layers [J]. *Optics Communications*, 2011, 284(16/17): 4022-4027.
- [14] HA N Y, OHTSUKA Y, JEONG S M, et al. Fabrication of a simultaneous red-green-blue reflector using single-pitched cholesteric liquid crystals [J]. *Nature Materials*, 2008, 7(1): 43-47.
- [15] LIN J D, CHU C L, LIN H Y, et al. Wide-band tunable photonic bandgaps based on nematic-refilling cholesteric

liquid crystal polymer template samples [J]. *Optical Materials Express*, 2015, 5(6): 1419-1430.

- [16] KIM K, HUR S T, KIM S, *et al.* A well-aligned simple cubic blue phase for a liquid crystal laser [J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2015, 3(21): 5383-5388.

作者简介:



查升毫(1992—),男,安徽安庆人,硕士研究生,2015 年于宿州学院获得学士学位,主要从事模板化蓝相液晶材料与器件方面的研究。E-mail: zhashenghao@sjtu.edu.cn



陆建钢(1973—),男,浙江嘉兴人,博士,研究员,2003 年于浙江大学获得博士学位,从事液晶材料与光电器件方面的研究。E-mail: lujg@sjtu.edu.cn