

复合周期的介质-液晶光子晶体研究*

何正红¹⁾²⁾ 叶志成^{1)†} 李争光¹⁾ 崔晴宇¹⁾ 苏翼凯¹⁾

1) (上海交通大学显示与照明中心, TFT-LCD 关键材料与技术国家工程实验室, 上海 200240)

2) (西南大学物理科学与技术学院, 重庆 400715)

(2010年4月19日收到; 2010年5月19日收到修改稿)

本文研究了掺入各向同性周期性介质层缺陷的一维复合周期胆甾型液晶光子晶体的禁带特性. 发现同一般的胆甾型液晶不同, 复合介质-液晶周期结构对左旋偏振入射光和右旋入射光都会出现共同禁带. 当各向同性介质层占一个周期的厚度比例越小, 左旋偏振光的禁带效应逐渐消失, 而右旋偏振光的禁带则逐渐合并变大; 且各向同性介质的折射率越大, 则两种偏振光的禁带效应越明显, 更容易出现共同禁带; 通过调整厚度比, 可以在可见光范围内出现对应红、绿、蓝色波长的禁带, 从而可以用于液晶显示的反射式彩色滤光片.

关键词: 胆甾型液晶, 光子晶体, 禁带, 缺陷

PACS: 42.70.Df, 42.70.Qs

1. 引言

光子晶体在 1987 年由 John 和 Yablonovitch 分别独立提出, 是具有周期性折射率分布的人工材料, 其最大的特征是出现光子禁带, 即频率在禁带内的光无法在其内传播^[1,2]. 基于这些特性, 光子晶体可被用于超快光开关、可调滤波器、光波导等光学器件^[3-10]. 除了台阶型折射率分布的光子晶体外, 折射率渐变的螺旋结构胆甾型液晶 (ChLCs) 也具有类似光子晶体的特性. 研究表明, ChLCs 对手性和螺旋矢量与其一致的圆偏振 (CP) 光具有禁带作用, 由于通过施加电场可以灵活调节其禁带结构, 因此其在电光可控开关、通讯等方面具有巨大的应用潜力^[11].

当改变光子晶体的一个周期或者几个周期的折射率、尺寸或者占空比等参数时, 就可以在禁带中产生缺陷态, 光子将被局域在缺陷中^[12-16]. 同样, 在 ChLCs 光子晶体也是如此, 例如, Yang 等研究了在两层 ChLCs 中间插入一薄层各向同性介质引起的缺陷模式, 并分析了介质折射率对缺陷模式的影响^[11]; Schmidtke 等发现掺入染料的胆甾型聚合物

中引起的缺陷可作为激光器微腔^[17,18]; Kopp 等发现在手性光子晶体中, 沿旋转轴方向扭曲会引发缺陷从而产生可控的透射峰^[19]; Matsui 等发现改变局部螺距的长度可引起缺陷, 这种缺陷的位置可以通过控制螺距形变程度来确定^[20]. 上述缺陷都是改变单个螺距或者是液晶层之间插入单层介质所引起的相位跳跃. 本文利用 Berreman 4×4 传输矩阵方法研究具有周期性“缺陷”的复合周期 ChLCs 光子晶体随“缺陷”折射率、厚度变化的偏振、禁带规律, 其具有单一周期液晶光子所没有的偏振无关共同禁带特性; 通过调整参数可在可见光区域出现双禁带, 可应用于液晶显示彩色滤光片.

2. 液晶光子晶体的理论分析方法

一般研究光子晶体的方法有传输矩阵、平面波展开以及时域有限差分等方法. 本文将利用 Berreman 4×4 传输矩阵方法^[21] 研究左旋椭圆偏振光 (LEP) 和右旋椭圆偏振 (REP) 光通过一维复合周期光子液晶光子晶体后透射光的光谱性质, 该复合型光子晶体由在 ChLCs 中掺入周期性各向同性介质层 (IDLs) 组成, 折射率为 n_a , 其结构如图 1 所示.

* 上海交大晨星计划 (批准号: A2687B), 国家自然科学基金 (批准号: 60906039), 上海市科学基金 (批准号: 09ZR1414800) 和上海市曙光工程 (批准号: 09SG13) 资助的课题.

† 通讯联系人. E-mail: yzhch@sjtu.edu.cn

Z 轴是 ChLCs 的扭轴, ChLCs 是右手手性的, 其螺距 P_0 是 $0.345 \mu\text{m}$, 此结构的外部折射率 $n_0 = 1.6$, 非寻常光的折射率 $n_e = \sqrt{\varepsilon_{\parallel}} = 1.7$, 寻常光的折射率 $n_o = \sqrt{\varepsilon_{\perp}} = 1.5$, 每个周期内的 IDLs 厚度为 d ,

ChLCs 厚度为 D , 厚度比 $\alpha = D/d$. 液晶指向矢 $\hat{n} = [\cos(q_0z), \sin(q_0z), 0]$, 介电常数张量为 $\varepsilon(z), \varepsilon_{ij} = \varepsilon_{\perp} \delta_{ij} + \Delta\varepsilon n_i n_j$, 其中 $(i, j) \in \{x, y, z\}, \delta_{ij}$ 是 Kronecker delta 函数, $\Delta\varepsilon = (\varepsilon_{\parallel} - \varepsilon_{\perp})$.

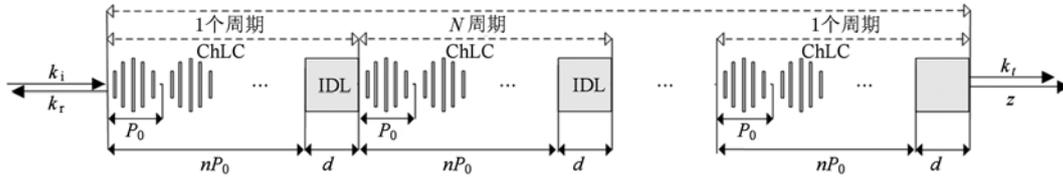


图1 复合周期介质-液晶光子晶体结构示意图

Berreman 的 4×4 传输矩阵方法如下: 频率为 ω 的单色椭圆偏振光在 xy 平面内, 电场 E 和磁场 H 的 x - y 分量可以被写成如下形式:

$$\begin{pmatrix} E_x(x, y, z, t) \\ E_y(x, y, z, t) \\ H_x(x, y, z, t) \\ H_y(x, y, z, t) \end{pmatrix} = \psi(z) e^{-i\omega(t - \eta x/c)}, \quad (1)$$

其中光波被认为在 x - z 平面内传播, $\psi(z)$ 为列向量, η 正比于与波矢 k 的 x 分量, 在本文考虑正入射情况下 $\eta = 0$,

$$\frac{d\psi(z)}{dz} = i \frac{\omega}{c} B(z) \psi(z), \quad (2)$$

$B(z)$ 是与介电常数和入射波矢量有关的 Berreman 矩阵. 当把 ChLCs 划分为足够细的薄片层, 每一层内 $B(z)$ 就可以被认为是常数, 同时认为介质为非磁性材料因此 $\mu = 1$. 在以上的近似处理下 Berreman 矩阵 B 可以写成

$$B = \begin{pmatrix} -\eta \frac{\varepsilon_{zx}}{\varepsilon_{zz}} & \eta \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{zz}} & 0 & 1 - \frac{\eta^2}{\varepsilon_{zx}} \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ \varepsilon_{yx} \frac{\varepsilon_{zx}}{\varepsilon_{zz}} - \varepsilon_{yx} & \eta^2 - \varepsilon_{yx} + \varepsilon_{yx} \frac{\varepsilon_{zy}}{\varepsilon_{zz}} & 0 & \eta \frac{\varepsilon_{yz}}{\varepsilon_{zz}} \\ \varepsilon_{xx} - \varepsilon_{xz} \frac{\varepsilon_{zx}}{\varepsilon_{zz}} & \varepsilon_{xy} - \varepsilon_{xz} \frac{\varepsilon_{zy}}{\varepsilon_{zz}} & 0 & -\eta \frac{\varepsilon_{xz}}{\varepsilon_{zz}} \end{pmatrix}. \quad (3)$$

根据 Cayley-Hamilton 定理, 每层的传输矩阵可以通过方程(2)计算出来^[22]

$$\psi(z) = \exp\left[i \frac{\omega}{c} B(z)\right] \psi(0). \quad (4)$$

通过(4)式分别计算了厚度比和介质层折射率对透射谱的影响.

3. 厚度比对透射光谱的影响

首先考虑椭圆偏振(EP)光入射情况. 在 IDLs 厚度 d 固定的情况下, 通过计算发现当 α 的值改变时, LEP 和 REP 的“缺陷”将会发生变化. LEP 和 REP 入射光的透射光谱如图 2 所示, IDLs 折射率 $n_d = 2.04$. 在图 2(d) ($\alpha = 7$) 中可以看到对于 REP 入射光在 520 nm 到 600 nm 波长范围出现禁带, 同时在 550 nm 处出现一个类似“缺陷”的透射峰, 而对于 LEP 光则在该处出现一个禁带反射峰. 从图 2(d) 到图 2(b) 还可以看出, 当 α 由 7 变到 4 时, “缺陷”模会变宽, 对应 REP 会出现一个透射带, 而 LEP 出现反射带.

当 α 变化时 REP 禁带位置也会发生改变. 当 α 从 1 开始增加时, 原来两个禁带会向 $\lambda = 550 \text{ nm}$ 移动, 最后会成为一个禁带, 如图 3 所示. 在图 3(a) 中 $\alpha = 1$, RE 光出现两个禁带, 分别位于长波长区域 ($608 \text{ nm} \leq \lambda \leq 650 \text{ nm}$) 和短波长区域 ($480 \text{ nm} \leq \lambda \leq 530 \text{ nm}$); 当 α 增加时, 短波长处禁带向长波长方向移动, 长波长处禁带则向短波长方向移动; 当没有 IDLs 时候, 即 $d = 0$ 时两个禁带会合并成一个禁带 ($518 \text{ nm} \leq \lambda \leq 583 \text{ nm}$). 对于图 2 所示的特性解释如下, 在光子晶体中干涉带的半宽由 Fabry-Perot 衍射面决定, “缺陷”模数由缺陷层的光程决定, α 逐渐增加也就意味着缺陷层的光程变小, “缺陷”的宽度变窄; 反之当 α 变小就意味着缺陷层的光程变大, 缺陷模数变多而使“缺陷”变宽; 当 α 足够小时, REP 的透射谱会出现两个禁带(图 2(a)); 当 α 足够大时(无 IDLs), REP 出现一个禁带(图 2(e)); 当 $\alpha = 7$ (图 2(d))时, 对于 REP 和 LEP 入射光则会同时出现一个非对称“缺陷”态.

当 α 从 1 逐渐增加时与 REP 光的禁带逐渐合

并变大不同的是 LEP 的禁带效应逐渐消失. 在 $\alpha = 1$ 时(图 2(a)) LEP 光在 $\lambda = 635 \text{ nm}$ 处出现一个反

射峰,随着 α 增加 LEP 光反射带逐渐变窄,当 $d = 0$ (图 2(e))LEP 光完全透射.

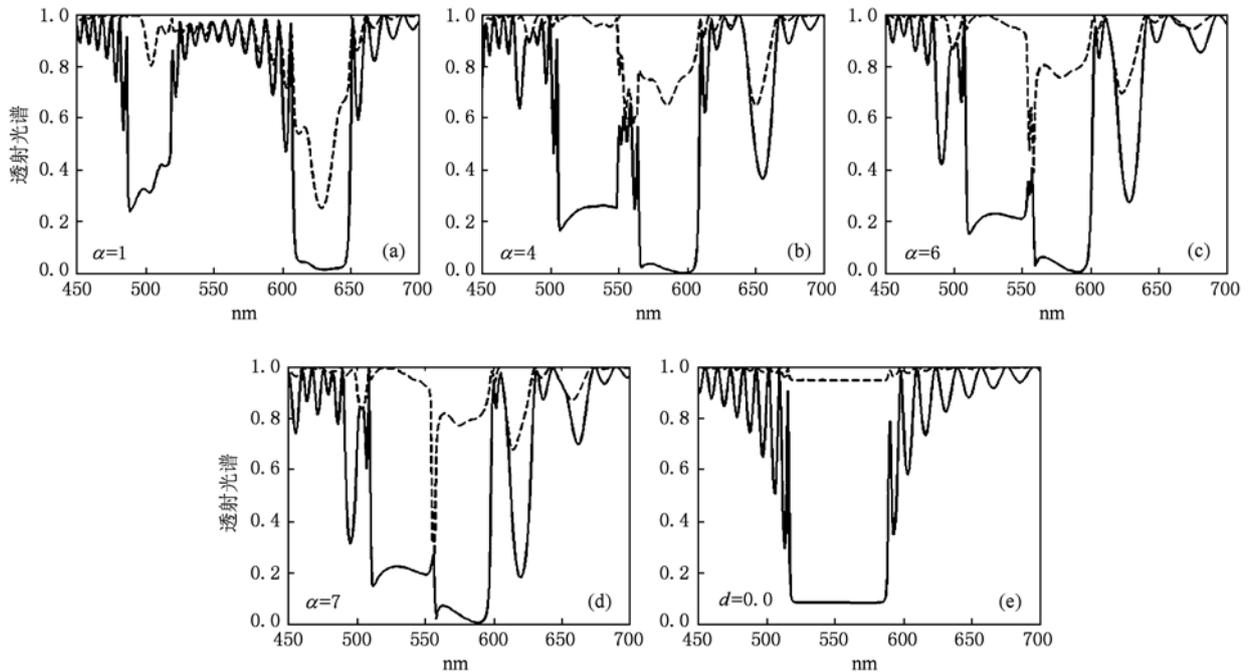


图 2 入射光为 REP(实线)和 LEP(虚线)透射光谱图,IDLs 折射率 $n_d = 2.04$,厚度比 α 从 1 逐渐增加

不同于 EP 入射光禁带出现非对称性,CP 射光透射谱会显示出不同于 EP 入射光的特性. CP 光入射的情况下禁带会出现对称性,如图 3(a)所示的在 $n = 2$ 时左右旋圆偏振入射光透射光谱图. 对于左旋圆偏振(LCP)入射光,在 557 nm 处出现对称反射峰,而在同样位置右旋圆偏振光(RCP)会出现一个

透射峰,RCP 在 $512 \text{ nm} \leq \lambda \leq 593 \text{ nm}$ 出现禁带. 图 3(b)表示在 $n = 2$ 时单个周期内的厚度比在 $4 \leq \alpha \leq 9$ 范围内变化的“缺陷”宽度变化图,上下两条虚线分别表示“缺陷”的起始位置. 从图中可见,当 α 增加时“缺陷”线宽会变窄,直至变成单个的缺陷态.

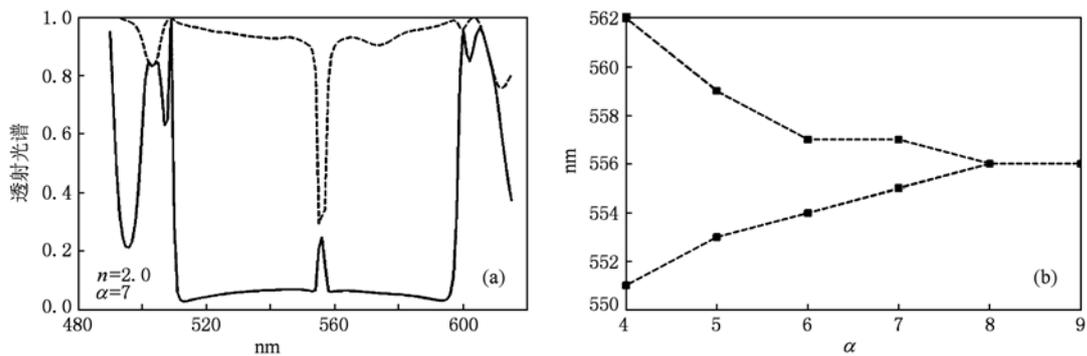


图 3 (a) RCP 和 LCP 光透射光谱图,实线表示 RCP,虚线表示 LCP,IDLs 折射率 $n_d = 2$, $\alpha = 7$, IDLs 厚度为 P_0 ; (b) LCP 光“缺陷”带随 α 变化图, $n_d = 2$

4. IDLs 折射率 n_d 对禁带的影响及其应用

当 α 固定的时候,改变 IDLs 折射率 n_d 对禁带

也会有影响. 当 n_d 从 1.9 开始增加时,REP 和 LEP 开始出现共同禁带. 图 4 表示入射的 REP 和 LEP 透射光谱图, $1.9 \leq n \leq 2.5, \alpha = 1$. 当 IDLs 折射率 $n_d = 2.2$ 时,REP 和 LEP 入射光具有明显的共同的禁

带,中心波长分别在 418 nm 和 658 nm(图 4(b)). 从图 4(a)到图 4(b),可以看到,随着 IDLs 折射率 n_d 的增加,REP 和 LEP 具有的共同禁带数目也会增加,而且整个透射谱向长波长方向移动,同时禁带

的效应更加明显. 这种共同禁带性质可以用于滤波器的制作,下面以绿光滤光片为例对其特性进行讨论.

利用 RCP 和 LCP 具有共同禁带并且可调控的

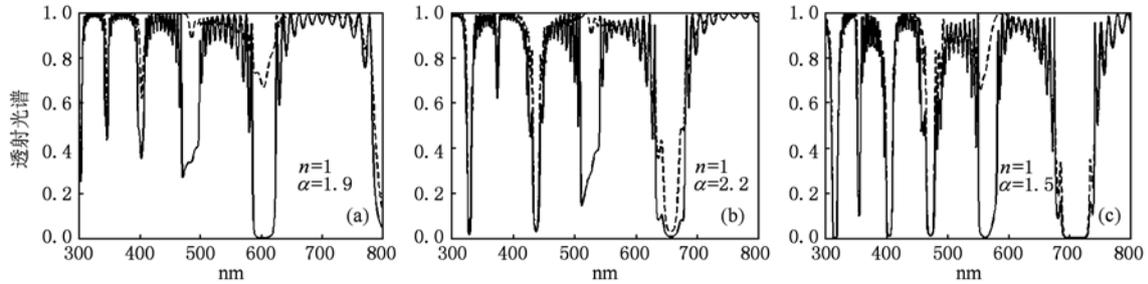


图 4 入射的 REP(实线)和 LEP(虚线)光通过图 1 所示结构的透射光谱图 ($\alpha = 1$, IDLs 折射率变化范围为 $1.9 \leq n_d \leq 2.5$)

特点,我们可以设计反射式彩色滤光片,如图 5 所示的绿色滤光片为例. 图 5(a)为原理示意图,图中 RGB 分别表示红绿蓝三种入射光,经过光子晶体之后,红光和蓝光被反射,绿光透射. 图 5(b)为可见光区在 $n_d=2.2$ $\alpha = 2$, $D = P_0$ 条件下 LCP 光和 RCP

光通过反射式绿色滤光片的透射光谱图,实线表示 RCP 光透射谱,虚线表示 LCP 光的透射谱,共同禁带的位置为 462 nm 和 627 nm,可以看到在红光区域和蓝光区域有共同的禁带,而绿光区域可以透射,利用该特点可以制作可用于液晶显示的反射式

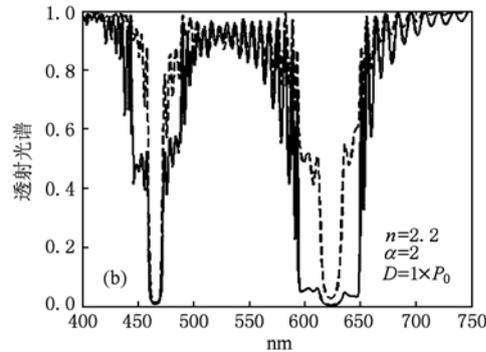
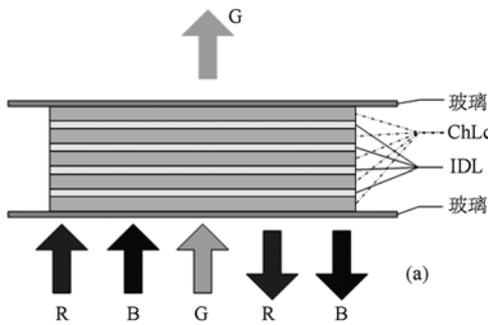


图 5 (a) 红蓝光滤光片原理图;(b) 红蓝光滤光片的透射光谱图

彩色滤光片.

通过前面的研究我们知道介质层的折射率 n_d 对禁带的特性影响很大. 如图 6(a)显示了绿光滤光片禁带中心波长随折射率的变化图,上下两条实线表示两个禁带的中心波长随 n_d 变化,实线上下的虚线表示相应禁带的起始与终止位置随 n_d 变化. 我们可以发现随着介质折射率的增加,长波长禁带在 $n = 2.2$ 处禁带带隙会变宽,短波长禁带带隙基本保持不变,并且中心波长会向长波长方向移动. 由于布拉格干涉的光程差在不同入射角度下会发生变

化,因此禁带的位置会发生移动. 图 6(b)中的上下两条实线分别表示两个禁带的中心波长随入射角 θ 变化,每条实线上下的虚线分别表示相应禁带的起始与终止位置随入射角 θ 变化,由图可知随着入射角的增加,禁带的中心波长会向短波长方向移动. 当入射角 θ 为 $\pi/6$ 时两个禁带都是向短波长处移动 50 nm,使彩色滤光片产生一定的色偏. 以上只是给出了绿色滤光片,而对于蓝色和红色滤光片,通过改变单个周期内的 ChLCs 和 IDLs 厚度比 α 同样可以获得.

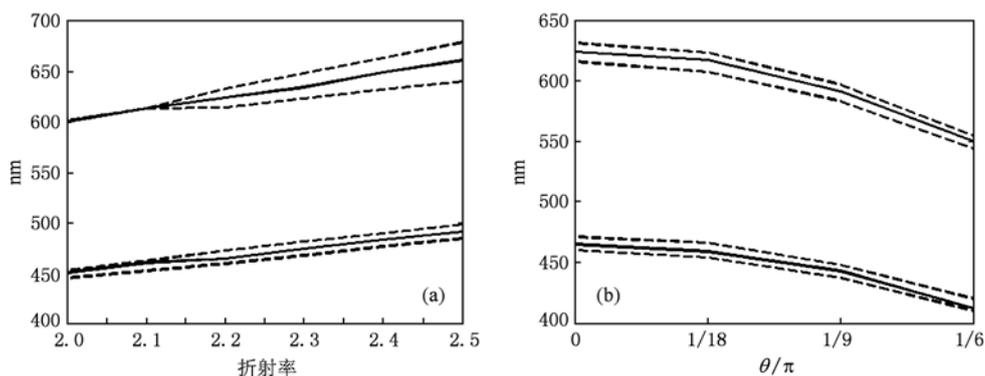


图6 (a) 绿光滤光片禁带随介质折射率;(b) 绿光滤光片禁带随入射角度变化图

5. 结 论

本文以掺入周期性缺陷介质层的 ChLCs 为对象,研究了一维复合周期胆甾型液晶光子晶体的禁带特性:和传统的单一液晶区别的是,入射光的手性与液晶的手性不一致也能出现禁带;当各向同性介质层占一个周期的厚度比例越小,左旋偏振光的

禁带效应逐渐消失,而右旋偏振光的禁带则逐渐合并变大;基于此特性可以制作窄带滤波器;而各向同性介质的折射率越大,则两种偏振光的禁带效应越明显,更容易出现共同禁带;在周期性缺陷介质层折射率 $n_d \geq 1.9$ 的情况下,REP 和 LEP 入射光开始具有共同的禁带,当 n_d 增加时共同禁带中心波长会向长波长方向移动,基于可见光范围内双禁带可控的特点可以设计出彩色滤光片。

- [1] Yablonovitch E 1987 *Phys. Rev. Lett.* **58** 2059
- [2] John S 1987 *Phys. Rev. Lett.* **58** 2486
- [3] Ma G, Shen J, Zhang Z, Hua Z, Tang S H 2006 *Opt. Express* **14** 858
- [4] Miroshnichenko A E, Brasselet E, Kivshar Y S 2008 *Appl. Phys. Lett.* **92** 253306
- [5] Jim K L, Wang D Y, Leung C W, Choy C L, Chan H L W 2008 *J. Appl. Phys.* **103** 083107
- [6] Nėmec H, Duvillaret L, Garet F, Kuzel P, Xavier P, Richard J, Raully D 2004 *J. Appl. Phys.* **96** 4072
- [7] Xiang Y J, Dai X Y, Wen S C, Fan D Y 2008 *Opt. Lett.* **33** 1255
- [8] Taniyama H 2002 *J. Appl. Phys.* **91** 3511
- [9] Lan S, Kanamoto K, Yang T, Nishikawa S, Sugimoto Y, Ikeda N, Nakamura H, Asakawa K, Ishikawa H 2003 *Phys. Rev. B* **67** 115208
- [10] Boudouti E H El, Hassouani Y El, Aynaou H, Djafari-Rouhani B, Akjouj A, Velasco V R 2007 *J. Phys. : Condens. Matter* **19** 246217
- [11] Yang Y C, Kee C S, Kim J E, Park H Y 1999 *Phys. Rev. E* **60** 6852
- [12] Zhang H, Zhao J L, Zhang X J 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 3532 (in Chinese) [张浩、赵建林、张晓娟 2009 物理学报 **58** 3532]
- [13] Zheng Z G, Li W C, Liu Y G, Xuan L 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 7344 (in Chinese) [郑志刚、李文萃、刘永刚、宣丽 2008 物理学报 **57** 7344]
- [14] Quan X L, Yuan X B 2009 *Chin. Phys. B* **18** 5315
- [15] Zhou P, You H Y, Wang S Y, Li H Y, Yang Y M, Chen L Y 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 2276 (in Chinese) [周鹏、游海洋、王松有、李合印、杨月梅、陈良尧 2002 物理学报 **51** 2276]
- [16] Feng Z F, Wang X G, Li Z Y, Zhang D Z 2008 *Chin. Phys. B* **17** 1101
- [17] Schmidtke J, Stille W, Finkelmann H 2003 *Phys. Rev. Lett.* **90** 083902
- [18] Schmidtke J, Stille W 2003 *Eur. Phys. J. E* **12** 553
- [19] Kopp V I, Genack A Z 2002 *Phys. Rev. Lett.* **89** 033901
- [20] Matsui T, Ozaki M, Yoshino K 2004 *Phys. Rev. E* **69** 061715
- [21] Berreman D W 1973 *J. Opt. Soc. Am.* **63** 1374
- [22] William L. Brogan 1985 *Modern Control Theory* (2nd ed Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ)

Compound photonic crystals with cholesteric liquid crystals sandwiched isotropic defect layers^{*}

He Zheng-Hong¹⁾²⁾ Ye Zhi-Cheng^{1)†} Li Zheng-Guang¹⁾ Cui Qing-Yu¹⁾ Su Yi-Kai¹⁾

1) (*Displays and Lighting Center, Shanghai Jiaotong University, National Engineering Lab of TFT-LCD Materials and Technologies, Shanghai 200240, China*)

2) (*School of Physical Science and Technology, Southwest University, Chongqing 400715, China*)

(Received 19 April 2010; revised manuscript received 19 May 2010)

Abstract

Forbidden gaps of one-dimensional compound photonic crystals consisting of cholesteric liquid crystals sandwiched by periodic isotropic layers are investigated. The common forbidden gaps appear for both incident left and right polarization light which is different from the cholesteric liquid crystals. The forbidden gaps for incident left polarization light will disappear and the forbidden gaps for incident right polarization light will merge and become wider with the increasing of thickness ratio of cholesteric liquid crystals to periodic isotropic layers. The effect of forbidden gaps for incident left and right polarization light becomes obvious with the increasing of refractive index of periodic isotropic layers. The corresponding forbidden gaps for two colors of red, green and blue will appear by tuning thickness ratio of cholesteric liquid crystals to periodic isotropic layers and the refractive index of periodic isotropic layers, which can be used to fabricate reflective color filters for liquid display.

Keywords: cholesteric liquid crystals, photonic crystal, band gap, defect

PACS: 42.70.Df, 42.70.Qs

^{*} Project supported by the Shanghai Jiaotong University Chenxin Plan (Grant No. A2687B), the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60906039), Shanghai Natural Science Foundation (Grant No. 09ZR1414800), and the Shanghai Shuguang program (Grant No. 09SG13).

[†] Corresponding author. E-mail: yzhch@sjtu.edu.cn