

文章编号:1007-2780(2015)05-0777-07

# 基于 Berreman $4 \times 4$ 矩阵对胆甾相液晶 Bragg 反射带宽的模拟研究

赵 静\*, 李庆丽, 许利军  
(张家口学院, 河北 张家口 075000)

**摘要:**利用 Berreman  $4 \times 4$  矩阵和 Matlab 编程模拟了胆甾相液晶的反射光谱, 分析了螺旋数(液晶厚度)、基板的折射率、双折射、折射率色散、固定螺距、梯度螺距和入射角等因素对反射光谱带宽的影响。结果表明, 要得到理想的 Bragg 反射带宽, 液晶层的厚度即螺旋数  $N$  需达到  $N \geq 10$ ; 基板折射率会影响最大反射率, 基板折射率  $n_g$  与寻常光折射率  $n_o$  相比,  $n_g < n_o$  时, 最大反射率比较低,  $n_g$  越小越影响明显, 当  $n_g \geq n_o$  时, 具有很好的反射率; 折射率的色散和大的入射角会使带宽变窄, 而大的双折射  $\Delta n$  和螺距  $P$  可以得到较宽的反射带宽, 但拓宽效果有限。通过梯度螺距的函数表达式, 理论模拟了具有螺距梯度的胆甾相液晶的反射带宽, 其对于胆甾相液晶宽波反射的实验研究具有一定的意义。

**关键词:**胆甾相液晶; Berreman  $4 \times 4$  矩阵; Bragg 反射; 带宽; 螺距梯度  
**中图分类号:** O753.2    **文献标识码:** A    **doi:** 10.3788/YJYXS20153005.0777

## Simulation research on Bragg reflection bandwidth of cholesteric liquid crystal based on Berreman $4 \times 4$ matrix

ZHAO Jing, LI Qing-li, XU Li-jun

(Zhangjiakou University, Zhangjiakou 075000, China)

**Abstract:** This research simulates the reflection spectrum of cholesteric liquid crystal by Berreman  $4 \times 4$  matrix and Matlab program, and analyses the factors that affect the bandwidth of reflection spectrum, such as pitch number (thickness of liquid crystal), refractive index of substrate, birefringence, dispersion of refractive index, fixed pitch, pitch gradient, incident angle and so on. The result illustrates that in order to get an ideal Bragg reflection bandwidth, the thickness of the liquid crystal, the pitch number  $N$ , must reach  $N \geq 10$ ; The substrate refractive index can impact the maximum reflection, which will be relatively low when the substrate refractive index  $n_g$  is smaller than the common light reflection and the affection is more obvious as the  $n_g$  becomes smaller when  $n_g \geq n_o$ , a perfect reflection can be attained. The dispersion reflection and big incident angle will make the bandwidth become narrow, while large birefringence  $\Delta n$  and pitch  $P$  lead to broader bandwidth, but the broadening effects is finite. The reflection bandwidth of the pitch gradient cholesteric liquid crystal was simulated theoretically by giving the function expression of pitch gradient, which makes sense for the experimental study of broadband reflection of cholesteric liquid crystal.

**Key words:** cholesteric liquid crystal; Berreman 4 × 4 matrix; Bragg reflection; bandwidth; pitch gradient

1 引言

胆甾相液晶大致可分为含胆固醇基环的胆固醇衍生物和把光学活性添加剂加入向列相液晶使液晶分子排列转变形成的胆甾相液晶。在空间上胆甾相液晶的指向矢  $n$  并不一致,而是沿着螺旋轴盘旋而上,因此液晶分子的指向矢在螺旋轴上具有周期性。将指向矢旋转  $360^\circ$  的间距称为一个螺距,一般用  $P$  表示。由于  $n$  和  $-n$  的不可区分性,所以胆甾相液晶的空间周期  $L$  是其螺距  $P$  的一半。螺旋状的分子排列,使胆甾相液晶具有独特的光学性质,其中最重要的特性之一就是 Bragg 反射。近些年来,胆甾相液晶的 Bragg 反射是人们研究的热点问题。尤其是将胆甾相液晶应用反射式显示,反射式偏振片,滤光片,光学增亮膜,节能玻璃及涂料等方面<sup>[1-4]</sup>,但其也存在一个很大的缺点就是 Bragg 反射光谱带宽的宽度不够,一般只有几十纳米,远远不能覆盖整个可见光区域,这就给胆甾相液晶的实际应用带来一些不利影响,例如在显示方面,这样就容易形成单色,而颜色与视角的相依性又很高。从而有许多研究以试图增加胆甾相液晶反射光谱的带宽,Broer 等人利用紫外光可聚合的胆甾相液晶单体与向列相液晶单体作为偏光材料,通过紫外光照射产生的浓度扩散效应使螺距产生梯度变化来拓展反射带宽<sup>[5]</sup>,Kralik 等人和美国中央佛罗里达大学的 Yu hua Huang 等人通过多层单一螺距叠加的方法使反射光覆盖可见光区域<sup>[6-7]</sup>,黄子强等人通过在液晶中引入纳米粒网络来展宽反射光谱<sup>[8]</sup>。在这些研究中,目前最常用的方法是通过某种方式(紫外线诱导、温度梯度等)使胆甾相液晶产生螺距梯度,从而反射带宽随着螺距的变化而加宽。

本文利用 Berreman 4 × 4 矩阵和 Matlab 编程模拟了胆甾相液晶的反射光谱,分析了影响反射带宽的因素,如螺旋数、基板的折射率、折射率色散、梯度螺距和入射角等,对拓展 Bragg 反射带宽进行了深入阐述,计算模拟结果对于胆甾相液晶宽波反射的实验研究具有一定的意义。

2 理论分析

2.1 反射率计算

光在胆甾相液晶中传播如图 1 所示,假设入射光在  $x-z$  平面入射。根据麦克斯韦方程可以得到:

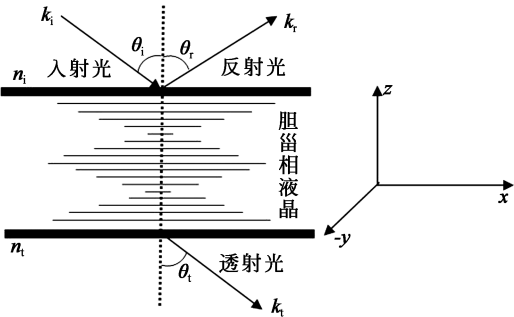


图 1 光在胆甾相液晶中传播的坐标示意图  
Fig. 1 Coordinate diagram of light propagation in cholesteric liquid crystal

$$\frac{\partial \phi}{\partial z} = -ik_0 \Delta \phi, \tag{1}$$

其中:  $\phi = (E_x, \eta_0 H_y, E_y, -\eta_0 H_x)$ ,

$$\Delta = \begin{bmatrix} 0 & 1 - \frac{n^2 \sin^2 \theta}{\epsilon_{zz}} & 0 & 0 \\ \epsilon_{zx} & 0 & \epsilon_{zy} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \epsilon_{yx} & 0 & \epsilon_{yy} - n^2 \sin^2 \theta & 0 \end{bmatrix}.$$

$\Delta$  矩阵被称为 Berreman 4 × 4 矩阵<sup>[9]</sup>,其依赖于胆甾相液晶的介电常数并且为  $z$  的函数,在  $z$  附近有一个微小的变动  $h$ ,若  $h$  足够小,可将其看作一个常数时,方程(1)的解可写成:

$$\phi(z+h) = P(h)\phi(z), \tag{2}$$

其中:  $P = e^{-ik_0 \Delta h}$ 。

假设整个液晶盒中的液晶分为  $M$  层,根据式(2)可以得到:

$$\begin{aligned} \phi(z_M) &= P(d) \cdot \phi(z_0) = P(h_M) \cdot \\ &P(h_{M-1}) \cdots P(h_2) \cdot P(h_1) \cdot \phi(z_0). \end{aligned} \tag{3}$$

在  $z=0$  和  $z=d$  处,由电磁场边界条件,其电磁场在边界的切线分量是连续的,可得:

$$\phi_t = P(d) \cdot (\phi_i + \phi_r). \tag{4}$$

假设胆甾相液晶夹在两个折射率为  $n_g$  的基

板之间,则入射光、反射光和透射光的 Berreman 矢量可分别表示为:

$$\phi_i = \begin{pmatrix} E_{xi} & \frac{n_g}{\cos \theta} E_{xi} & E_{yi} & n_g \cos \theta E_{xi} \end{pmatrix}. \quad (5)$$

$$\phi_r = \begin{pmatrix} E_{xr} & -\frac{n_g}{\cos \theta} E_{xr} & E_{yr} & -n_g \cos \theta E_{xr} \end{pmatrix}. \quad (6)$$

$$\phi_t = \begin{pmatrix} E_{xt} & \frac{n_g}{\cos \theta} E_{xt} & E_{yt} & n_g \cos \theta E_{xt} \end{pmatrix}. \quad (7)$$

只要给出了入射光的 Berreman 矢量  $\phi_i$ , 就可以通过解(4)式求得  $\phi_r$  和  $\phi_t$  中两个未知的变量  $E_x$ 、 $E_y$ 。

反射率的计算公式为<sup>[9]</sup>:

$$R = [ (E_{xr} / \cos \theta)^2 + E_{yr}^2 ] / [ (E_{xi} / \cos \theta)^2 + E_{yi}^2 ]. \quad (8)$$

2.2 Bragg 反射计算

当光正入射时, Bragg 中心反射波长和反射光谱带宽分别为:

$$\lambda = \bar{n} P, \quad (9)$$

$$\Delta \lambda = \Delta n P, \quad (10)$$

其中: 平均折射率  $\bar{n} = (n_e + n_o) / 2$ ,  $\Delta n = n_e - n_o$ ,  $n_e$  和  $n_o$  分别为液晶的非寻常光和寻常光折射率。

当光斜入射时, Bragg 中心反射波长和反射带宽为:

$$\lambda = \bar{n} P \cos \theta, \quad (11)$$

$$\Delta \lambda = \Delta n P \cos \theta, \quad (12)$$

其中:  $\bar{n} = \sqrt{(n_e^2 + 2n_o^2) / 3}$ ,  $\theta = \arcsin(\sin \theta_i / n_g)$ 。

当螺旋轴与基板法线有夹角  $\varphi$  时, Bragg 中心反射波长和反射带宽为:

$$\lambda = \bar{n} P \cos \varphi. \quad (13)$$

$$\Delta \lambda = \Delta n P \cos \varphi. \quad (14)$$

其中:  $\bar{n} = \sqrt{(n_e^2 + 2n_o^2) / 3}$ 。

3 结果与讨论

在模拟中, 入射光为圆偏振光且螺旋性与胆甾相液晶相同, 只考虑光从基板进入胆甾相液晶, 基板的折射率为  $n_g$ 。假设两边基板材质相同, 则在图 1 中  $\theta_i = \theta_r = \theta_t = \theta_0$ 。胆甾相液晶的折射率和螺距参数设置随模拟情况的不同而不同。下面具体分析螺旋数、基板折射率等参数对胆甾相液晶 Bragg 反射带宽的影响。

3.1 螺旋数 N 的影响

由于 Bragg 反射靠的是光在周期性结构内多重反射所形成的加强干涉, 因此胆甾相液晶中周期性结构的数量就成了很重要的参数。通过定义一个螺旋数  $N$  来表示此参数。假设胆甾相液晶的螺距为定值  $P$ , 因此液晶盒的厚度成了离散的分布。螺旋数  $N$  与液晶盒厚度  $d$  由下式定义:

$$d = N \cdot P. \quad (15)$$

图 2 为不同螺旋数的模拟结果 ( $n_e = 1.75$ ,  $n_o = 1.52$ ,  $n_g = 1.52$ ,  $P = 0.37 \mu\text{m}$ ,  $\theta_i = 0^\circ$ ,  $N = 1, 3, 5, 8, 10, 12, 14$ )。从图中可以看出, 当  $N = 1$  时, Bragg 反射的峰值并不明显且反射率非常低;  $N = 3$  时, 出现明显反射峰值, 但其反射带宽非常窄并且中心反射波长的反射率较低;  $N = 8$  时, 具有很好的反射峰值和带宽, 具有很高的反射率, 但是其带宽边缘不太明显; 当  $N \geq 10$  时, 反射带宽和带宽边缘非常明显, 且接近于全反射。因此, 要得到具有明显带宽的反射光谱, 胆甾相液晶的厚度需要达到一定的螺旋数。将  $n_e$ 、 $n_o$ 、 $P$  的值带入 Bragg 反射公式(9)和(10), 中心反射波长和带宽分别为  $604.95 \text{ nm}$  和  $85.1 \text{ nm}$ , 在具有明显反射峰值和带宽的情况下, 其与图 2 模拟的结果有很好的吻合度。

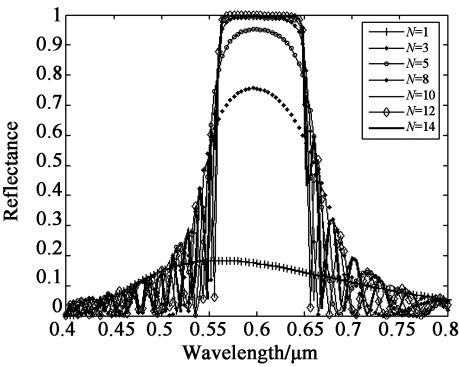


图 2 不同螺旋数 N 的 Bragg 反射

Fig. 2 Bragg reflections with different pitch number N

3.2 基板折射率的影响

为了简化计算, 假设液晶直接与基板相连, 则胆甾相液晶反射光谱与基板折射率的关系如图 3 所示 ( $n_e = 1.75$ ,  $n_o = 1.52$ ,  $P = 0.37 \mu\text{m}$ ,  $d = 12P$ ,  $\theta_i = 0^\circ$ ,  $n_g = 1.00, 1.32, 1.52, 1.72$ )。

从图 3 可以看出当  $n_g < n_o$  时, 最大反射率比较低,  $n_g$  越小越影响明显, 但其不影响反射光谱的

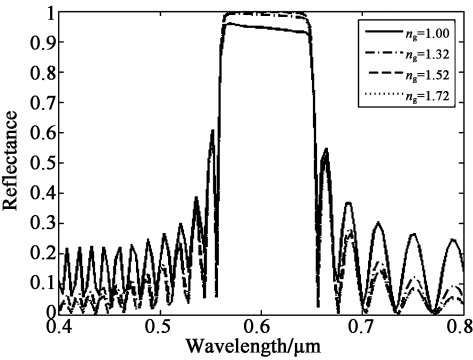


图 3 不同基板折射率的 Bragg 反射  
Fig. 3 Bragg reflections with different substrate refractive index

带宽;当  $n_g \geq n_0$  时,具有很好的反射率和反射带宽, $n_g$  对反射率和反射光谱基本没有影响。胆甾相液晶两侧基板的折射率虽然对反射光谱的带宽没有影响,但其会影响反射光谱的最大反射率。

3.3 折射率色散的影响

在实际的液晶材料中,折射率一般会存在色散,它与波长的关系如下<sup>[10]</sup>:

$$n_e = 1 + n_{0e} + g_{1e} \left( \frac{\lambda^2 \lambda_1^2}{\lambda^2 - \lambda_1^2} + m_e \frac{\lambda^2 \lambda_2^2}{\lambda^2 - \lambda_2^2} \right), \quad (16)$$

$$n_o = 1 + n_{0o} + g_{1o} \left( \frac{\lambda^2 \lambda_1^2}{\lambda^2 - \lambda_1^2} + m_o \frac{\lambda^2 \lambda_2^2}{\lambda^2 - \lambda_2^2} \right), \quad (17)$$

$$\Delta n = \Delta n_0 + G_1 \frac{\lambda^2 \lambda_1^2}{\lambda^2 - \lambda_1^2} + G_2 \frac{\lambda^2 \lambda_2^2}{\lambda^2 - \lambda_2^2}, \quad (18)$$

其中: $\Delta n_0 = n_{0e} - n_{0o}$ ,  $G_1 = g_{1e} - g_{1o}$ ,  $G_2 = g_{2e} - g_{2o}$ ,  $m_e = 0.5$ ,  $m_o = 1$ ,  $n_{0e} = 0.455$ ,  $n_{0o} = 0.405$ ,  $g_{1e} = 1.830$ ,  $g_{1o} = 1.313$ ,  $\lambda_1 = 200 \text{ nm}$ ,  $\lambda_2 = 282 \text{ nm}$ 。则液晶的折射率与波长的关系如图 4 所示。

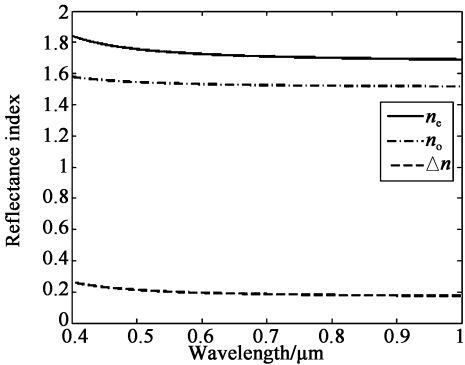


图 4 折射率的色散  
Fig. 4 Dispersion of refractive index

从图 4 中可以看出,液晶的折射率随波长的增加而减小,这将会导致在短波区域液晶的折射

率相对较高,反射会向长波方向移动,在长波区域液晶的折射率相对较低,反射会向短波方向移动,从而造成反射光谱带宽变窄。同时由于液晶的双折射随着波长的增加而减小,在长波区域反射带宽会变窄,所以在长波区域的 Bragg 反射一定要考虑胆甾相液晶材料的色散对反射带宽的影响。

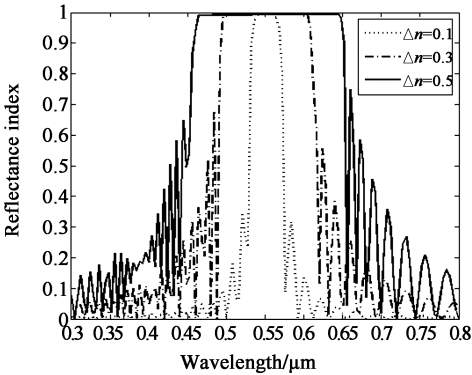


图 5 不同双折射  $\Delta n$  的 Bragg 反射  
Fig. 5 Bragg reflections with different birefringence  $\Delta n$

3.4 双折射的影响

从式(10)可以看出,在螺距固定的情况下,胆甾相液晶反射光谱的带宽与双折射  $\Delta n$  成正比关系,随着  $\Delta n$  的增加,反射带宽也随之变宽。图 5 给出了正入射情况下,反射带宽随  $\Delta n$  的变化。在模拟过程中保持中心反射波长不变,  $P = 0.34 \text{ μm}$ ,  $d = 16P$ ,  $\Delta n$  分别取 0.1, 0.3, 0.5。将  $P$  和  $\Delta n$  的值带入(10)式,可得带宽分别为 34 nm、102 nm、170 nm,对比图 5 和式(10)的结果,两者吻合得很好。从图 5 中可以看出,大的  $\Delta n$  可以拓展反射带宽。但由于受到液晶分子自身的限制,  $\Delta n$  是不能任意增加的,其值一般不超过 0.3。同时,即使具有很高  $\Delta n$  (0.5) 的液晶,其反射带宽仅有 170 nm,远不足以覆盖整个可见光区域。因此,尽管具有高双折射率的液晶可以被用来拓展带宽,但简单的增加  $\Delta n$  并不能得到满足液晶显示设备所需的带宽。

3.5 螺距的影响

改变胆甾相液晶的 Bragg 反射带宽,除了改变液晶的折射率外,还可以通过改变其螺距来实现。通过式(10)可以看出,  $\Delta n$  固定的情况下,大的螺距  $P$  也可以拓展反射带宽。但在实际应用中,多数是通过具有梯度变化的螺距来拓展反射带宽的。下面分两种情况来分析。

3. 5. 1 Δn 固定,不同的固定螺距

从图 6 可以看出,在正入射情况下,Δn(  $n_e=1.75, n_o=1.52$  )固定,螺距  $P$  分别为  $0.28\text{ }\mu\text{m}$ 、 $0.34\text{ }\mu\text{m}$ 、 $0.40\text{ }\mu\text{m}$ 。随着螺距的增大,反射带宽也增大,反射中心波长也向长波方向移动,产生红移并且其中心反射波长和带宽与(9)、(10)的计算结果相符。但从增加带宽以使其覆盖可见光区域并应用于显示设备的方面考虑,并且根据 Bragg 反射和螺距数的关系,大螺距要想产生很好的 Bragg 反射也需要较厚的液晶盒,增加生产成本,故此方法并不可取。

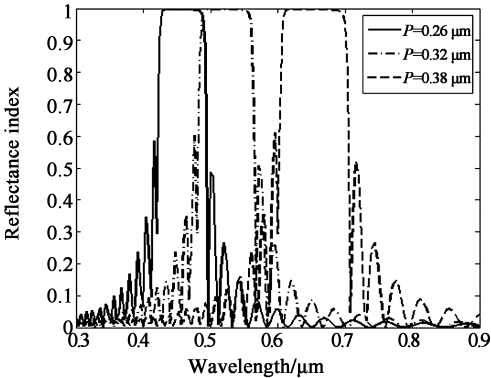


图 6 不同螺距的 Bragg 反射

Fig. 6 Bragg reflections with different pitch

3. 5. 2 螺距梯度

1995 年 Broer 等学者引入了螺距变化概念,通过某种方法使胆甾相液晶的螺距产生梯度变化,而反射带宽由于螺距的变化而加宽,其反射带宽可以用式(19)表示:

$$\Delta\lambda=n_{//}P_{\max}-n_{\perp}P_{\min}, \tag{19}$$

其中:  $P_{\max}$  和  $P_{\min}$  分别为最大螺距和最小螺距,反射带宽由与位置相关的螺距与双折射而定。螺距梯度结构可以用数学式来表示。

假设螺距梯度变化为线性函数,可以有两种描述方式<sup>[11]</sup>:

$$P_{\text{I}}(z)=P_{\min}\left(1+\frac{P_{\max}-P_{\min}}{P_{\min}}\frac{z}{d}\right). \tag{20}$$

$$P_{\text{II}}(z)=P_{\max}\left(1+\frac{P_{\min}-P_{\max}}{P_{\max}}\frac{z}{d}\right). \tag{21}$$

式(20)为入射光从小螺距  $P_{\min}$  方向入射,式(21)表示入射光从大螺距  $P_{\max}$  方向入射。图 7 给出了螺距变化按式(20)表示的胆甾相液晶的反射光谱,其中  $P_{\min}=0.24\text{ }\mu\text{m}$ ,  $P_{\max}=0.40\text{ }\mu\text{m}$ ,  $n_e=1.82, n_o=1.52, n_g=1.52, d=12P_{\min}$ 。将以上各

数值代入(19)式得反射带宽为  $363.2\text{ nm}$ ,其结果与图 7 对比相吻合。

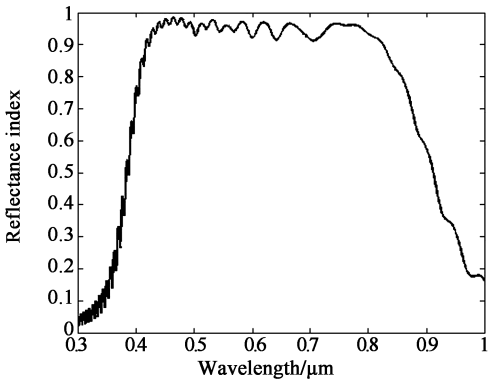


图 7  $P_{\text{I}}$  的 Bragg 反射对比

Fig. 7 Bragg reflections with  $P_{\text{I}}$

从图 7 可以看出,具有线性变化螺距的胆甾相液晶的反射带宽几乎可以覆盖整个可见光区域。如果适当向长波方向拓宽,可以补偿由于入射角不同而引起的蓝移。与等螺距胆甾相液晶在反射光谱上的另一个差别就是在反射带边缘的轮廓没有剧烈振荡,主要是因为螺距梯度的周期变化不如等螺距的周期变化那么严格,也可说螺距梯度结构实际上根本没有周期可言,只是螺距的变化有规则而已,因此在反射上因介电常数周期交错所产生的干涉现象并不会很剧烈。

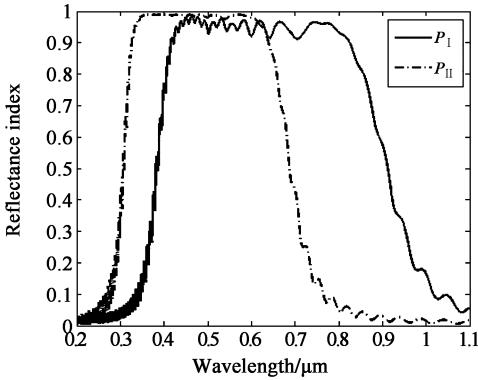


图 8  $P_{\text{I}}$  和  $P_{\text{II}}$  的 Bragg 反射对比

Fig. 8 Comparison of Bragg reflections between  $P_{\text{I}}$  and  $P_{\text{II}}$

具有  $P_{\text{I}}$  和  $P_{\text{II}}$  两种线性螺距梯度的胆甾相液晶的 Bragg 反射会存在很大差异。取与图 7 相同的参数进行模拟,结果如图 8 所示。从图中发现,  $P_{\text{II}}$  的反射光谱要比  $P_{\text{I}}$  的平滑,向短波方向移动且 Bragg 反射带宽变窄。

3.6 入射角的影响

随着入射角的增大,胆甾相液晶的 Bragg 反射中心波长会向短波方向移动,产生蓝移现象,如图 9 所示( $n_e=1.75, n_o=1.52, n_g=1.52, P=0.37\text{ }\mu\text{m}, d=12P, \theta_i=0^\circ, 10^\circ, 20^\circ$ )。从图 9 中可以看出反射光谱的带宽也稍微变窄,中心波长和反射带宽随入射角的变化满足 Bragg 反射公式(11)和(12)。

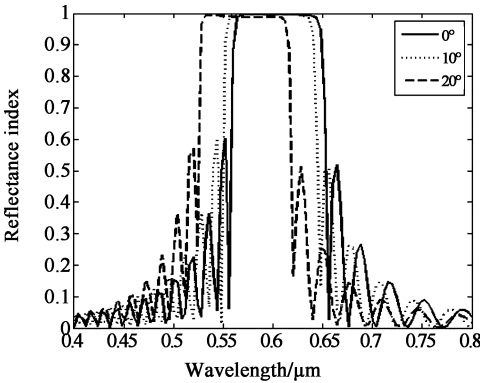


图 9 不同入射角的 Bragg 反射

Fig. 9 Bragg reflections with different incident angle

假设胆甾相液晶的螺旋轴与基板的法线有夹角  $\varphi$ 。在正入射情况下,其中心反射波长与反射带宽可以用(13)和(14)式来表示。所以随着螺旋轴与基板夹角的增大,中心反射波长向短波方向移动,反射带宽也变窄。因此在实际应用中,如果胆甾相液晶的螺旋轴不垂直于基板,则会产生蓝移现象,并且使反射带变窄。

4 结 论

利用  $4\times 4$  矩阵法并通过 Matlab 对胆甾相液晶反射光谱进行模拟,分析了影响反射光谱带宽的因素,如螺旋数  $N$ 、基板折射率、双折射、固定螺距和梯度螺距等。从模拟结果发现:胆甾相液晶 Bragg 反射的光谱带宽和峰值与螺旋数有很大的关系,要得到完美的反射光谱,液晶层要有一定的螺旋数(厚度),在本文模拟中螺旋数  $N$  满足  $N\geq 10$ ,反射光谱才有明显的反射带宽及带宽边缘,所以在实际应用中一定要注意液晶盒的厚度和反射带宽的关系;液晶两侧基板的折射率虽然不会影响反射光谱的带宽,但会对最大反射率产生一定的影响,当基板折射率和液晶折射率满足  $n_g\geq n_o$  时,这种影响将会被消除,所以实际应用时一定要考虑基板的折射率和液晶的折射率的匹配关系;实际中液晶的折射率存在色散,即  $n_e, n_o, \Delta n$  都是波长的函数,这将在一定程度上导致反射带宽变窄;随着入射角或螺旋轴和基板法线之间夹角的增大,反射带宽会变窄并向短波方向移动,产生蓝移现象;大的双折射  $\Delta n$  和螺距  $P$  可以得到较宽的反射带宽,但其拓宽效果有限,而具有梯度变化的螺距对反射带宽的拓宽效应非常明显,可以使反射光谱很容易的覆盖整个可见光区域,其理论计算模拟的拓展效果与已有的实验结果相符,这对具有宽波反射的胆甾相液晶的实验研究具有一定的意义。

参 考 文 献:

[1] 张天翼,许军,董佳焱. 胆甾型液晶显示技术和产业发展[J]. 液晶与显示,2011,26(6):741-745.  
Zhang T Y, XU J, Dong J Y. Overview of technology and industry for cholesteric liquid crystal display [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2011, 26(6): 741-745. (in Chinese)

[2] 李乐,李建峰,范炳生,等. 反射式胆甾相液晶偏振片及其应用[J]. 现代显示,1998,4(18):29-35.  
Li L, Li J F, Fan B S, et al. Reflective cholesteric liquid crystal polarizers and their applications [J]. *Advanced Display*, 1998, 4(18): 29-35. (in Chinese)

[3] 张大勇,李剑锋,刘仓理,等. 手性液晶滤光片研究[J]. 应用激光,2005,25(5):316-317.  
Zhang D Y, Li J F, Liu C L, et al. Study of cholesteric liquid crystals filter [J]. *Applied Laser*, 2005, 25(5): 316-317. (in Chinese)

[4] Moriya T N, Uchida, Matsushima K. 用胆甾液晶制备的新型宽视角透过式彩色滤光片[J]. 现代显示,2004,1(41):42-44.  
Moriya T N, Uchida, Matsushima K. Novel transmissive color filter using cholesteric liquid crystal with wide viewing angle[J]. *Advanced DI*, 2004, 1(41): 42-44. (in Chinese)

- [5] Broer D J, Lub J, Mol G N. Wide-band reflective polarizers from cholesteric polymer networks with a pitch gradient [J]. *Nature*, 1995, 378(6556): 467-469
- [6] Kralik J C, Fan B, Vithana H, *et al.* Backlight output enhancement using cholesteric liquid crystal films [J]. *Mol. Cryst. Liq. Cryst.*, 1997, 301: 798-794
- [7] Huang Y, Zhou Y, Wu S T. Broadband circular polarizer using stacked chiral polymer films [J]. *Opt. Express*, 2007, 15(10): 6414-6419.
- [8] 黄子强, 杨文君, 王继敏. 纳米网络对手性液晶反射光谱的展宽效应 [J]. *液晶与显示*, 2006, 21(1): 1-5.  
Huang Z Q, Yang W J, Wang J M. Bragg reflective spectrum broadened by nano-particle-network in chiral liquid crystals [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2006, 21(1): 1-5. (in Chinese)
- [9] Berreman D W. Optics in stratified and anisotropic media:  $4 \times 4$  matrix formulation [J]. *Opt. Soc. Am.*, 1972, 62(2): 502-510.
- [10] Wu S T. A Semiempirical model for liquidcrystal refractive index dispersion [J]. *J. Appl. Phys.*, 1991, 69(4): 2080-2087
- [11] Hong T X, Wu S T. Optical wave propagation in a cholesteric liquid crystal using the finite element method [J]. *Liq. Cryst.*, 2003, 30(3): 367-375.

作者简介: 赵静(1982—), 女, 河北崇礼人, 硕士研究生, 讲师, 研究方向为液晶物理。E-mail: yaya821010@sohu.com