

文章编号:1007-2780(2010)01-0021-08

液晶盒边界效应对胆甾相液晶电控螺距的影响

苑梦尧, 邓罗根*

(北京理工大学 理学院 物理系, 北京 100081)

摘 要: 研究了共面转换(IPS)液晶盒处于强锚定及弱锚定两种边界状态时横向电场与平面织构胆甾相液晶螺距的关系,探讨了液晶盒表面锚定对胆甾相液晶电控螺距的影响。理论结果表明,共面转换模式下电场可以调谐胆甾相液晶的反射光颜色,而边界锚定效应对电场调谐螺距有显著影响。这一结果为基于电控螺距原理的胆甾相液晶反射式彩色显示方案提供了理论上的依据。

关 键 词: 胆甾相液晶; 电控螺距; 锚定能; 共面转换

中图分类号: O753⁺.2 **文献标识码:** A

Effects of Liquid Crystal Cell's Boundary Conditions on Electric Tuning of Cholesteric Liquid Crystal Spiral Pitch

YUAN Meng-yao, DENG Luo-gen*

(Department of Physics, School of Science, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: The relations between the transverse electric field and the spiral pitch in the in-plane switching cholesteric liquid crystal cell under the different anchoring conditions are studied, and the influences of the surface anchoring states on the electric tune of the cholesteric liquid crystal spiral pitch are analyzed. The theoretical analysis shows that the electric field can tune continuously the reflected light color of the cholesteric liquid crystal under the in-plane switching mode, and the surface anchoring state of the liquid crystal cell has a great influence on the electric tune of the cholesteric liquid crystal spiral pitch. The results supply a theoretical support for the CLC color displays based on the electrically tunable pitch.

Key words: cholesteric liquid crystal; electrically tunable pitch; anchoring energy; in-plane switching mode

1 引 言

胆甾相液晶独特的螺旋结构使其表现出了许多有趣的光学特性,包括旋光性、圆偏振二色性、布拉格选择反射特性和螺距可调谐性等。由于具有这些特性,胆甾相液晶已得到很多应用,包括低能显示^[1]、无镜激光器^[2]和滤波器^[3]等。其中,胆

甾相液晶的选择反射特性在反射式液晶显示器的应用中显得尤为重要。如果可以自由控制胆甾相液晶的螺距,那么就可实现包括彩色信息的图像显示和记忆。

对胆甾相液晶的兴趣源于 20 世纪 60 年代。Harper^[4]和 Hansen 等人^[5]研究发现:电场可以改变胆甾相液晶盒反射光的颜色。1968 年,

收稿日期: 2009-06-22; 修订日期: 2009-07-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 10874016)

作者简介: 苑梦尧(1985—), 女, 河北石家庄人, 硕士研究生, 主要从事凝聚态液晶物理的研究。

* 通讯联系人, E-mail: luogen@bit.edu.cn

de Gennes^[6] 和 Meyer^[7] 理论上提出,垂直于胆甾相液晶盒螺旋轴的电场或磁场会使螺距加长,从而由布拉格定律可知反射光颜色会发生改变。当所加电场或磁场足够强时,胆甾相液晶将完全解旋成为场致向列相态。Meyer^[8] 和 Kahn^[9] 分别在磁场与电场条件下实验证实了上述理论结果。1979 年, Belyaev 与 Blinov^[10] 观察到强锚定情况下胆甾相液晶螺距随磁场离散变化的实验现象。1999 年,荆海等^[11] 在实验研究中指出:单面摩擦的共面转换液晶显示模式可消除其他共面模式带有的色移现象。2004 年, Li 小组^[12] 在实验中观察到横向电场作用下胆甾相液晶反射光颜色的变化。同年, Xianyu 等人^[13] 给出强锚定情况下胆甾相液晶螺距随电场离散变化的理论计算。2007 年,范志新等人^[14] 研究了胆甾相液晶电控螺旋畸变效应导致的布拉格反射特性。2008 年,邓罗根等人^[15] 研究了强锚定和忽略锚定情况下横向电场对胆甾相液晶螺距及反射特性的影响。

虽然在胆甾相液晶的场控螺距方面有不少研究工作,但有关共面转换模式下液晶盒的表面锚定状态如何影响胆甾相液晶的螺距和反射特性的问题还是一直没有得到很好的解决。本文根据稳定态下系统自由能最小的理论,研究了液晶盒表面锚定状态对胆甾相液晶电控螺距的影响,探讨了不同表面锚定状况下施加在胆甾相液晶盒上的横向电场与液晶螺距 P 之间的关系。利用 Matlab 软件,计算了强弱两种锚定情况下的胆甾相液晶的电控螺距曲线。结果表明,强锚定情况下,胆甾相液晶的螺距随电场的变化是阶梯型的;另外,电场增加和电场减小所对应的螺距随电场的变化曲线形成一种场致回线的形状。弱锚定情况下,螺距随电场连续变化;锚定强度系数的大小影响电控螺距曲线的位置,但不显著影响曲线的变化趋势。

2 液晶体系自由能

假设液晶盒由胆甾相液晶和两片经过预先处理的基板构成,基板表面与液晶分子之间的相互作用不可忽略。总的来说,这种相互作用可由锚定能来描述。锚定能是一种表面作用能,由锚定易取向方向和锚定强度表征,是界面能量的各向异性部分。所谓锚定易取向方向是指盒表面液晶分子的择优取向方向,即液晶分子被锚定的方向。Rapini 和 Papoular^[16] 最早将锚定能密度的表达

式改写为一维形式,称为 RP 公式。一般来说,锚定能密度表达式的单一参数形式可表示为^[17]:

$$U_s = -\frac{1}{2}A(\mathbf{n} \cdot \mathbf{e})^2 \quad (1)$$

式中 A 是锚定系数, $\mathbf{n}$ 是表面指向矢, $\mathbf{e}$ 是指向矢易取向方向。

当表面作用足够强时,液晶指向矢在表面有确定的方向,这种情况称为强锚定。小的外部约束就可以破坏表面处液晶分子取向的情形称为弱锚定。由式(1)可知:强锚定时,表面液晶指向矢有确定方向,锚定能为定值。由于在计算过程中只利用锚定能的微分值进行求解,因此,强锚定时表面作用可以忽略不计,液晶体系自由能主要表现为体畸变能;弱锚定时,表面液晶指向矢方向会随外场发生变化,因此弱锚定时表面能不可以忽略,液晶体系自由能表现为体畸变能和表面能之和。

液晶体系体畸变能包括弹性自由能与场致自由能。根据弗兰克公式,胆甾相液晶的弹性自由能密度表达式为^[18]:

$$U_{EL} = \frac{1}{2}k_1(\nabla \cdot \mathbf{n})^2 + \frac{1}{2}k_2(\mathbf{n} \cdot \nabla \times \mathbf{n} + q_0)^2 + \frac{1}{2}k_3(\mathbf{n} \times \nabla \times \mathbf{n})^2 \quad (2)$$

式中 $\mathbf{n}$ 为液晶分子指向矢, k_1 , k_2 和 k_3 分别为液晶分子展曲、扭曲和弯曲弹性常数。螺旋扭曲度 $q_0 = 2\pi/P_0$, P_0 为未施加电场时胆甾相液晶的螺距,即本征螺距。根据电磁理论,静电场所引起的液晶体系能量密度表达式为:

$$U_{ES} = \frac{1}{2}\mathbf{D} \cdot \mathbf{E} \quad (3)$$

式中 $\mathbf{E}$ 为液晶盒上所施加电场的电场强度, $\mathbf{D}$ 为电位移矢量。

3 理论基础

胆甾相液晶的螺旋结构表现为液晶分子指向矢扭曲周期排列,其自发扭曲轴称为螺旋轴。指向矢扭转 2π 时,螺旋轴通过的距离称为一个螺距,记为 P 。胆甾相液晶的周期性螺旋结构使其对可见光具有布拉格反射的特性,即当胆甾相液晶受到白光照射时,只有波长与液晶螺距相对应的入射光才能被反射。根据布拉格定律,光正入射液晶盒时,反射光的波长 λ 与螺距 P 之间满足如下关系^[19]:

$$\lambda = \bar{n} \cdot P \quad (4)$$

式中 $\bar{n}$ 为平均折射率,通常为定值不会改变。由于反射过程并不改变光的波长,则只有波长满足上述关系式的入射光才能被胆甾相液晶反射。如果给胆甾相液晶盒施加电压,胆甾相液晶的螺距会随电场强度的变化而变化,那么随着外加电压的不同,胆甾相液晶有可能反射不同波长的光。

利用电场调节螺距时,电场强度存在临界值 $E_s^{[20]}$ 。当所加电场 $E > E_s$ 时,胆甾相液晶螺距 $P \rightarrow \infty$,胆甾相液晶螺旋结构完全解旋为向列相结构,这个临界值称为饱和场强。

4 理论模型

给平面织构负性(即 $\Delta\epsilon < 0$)胆甾相液晶薄膜施加垂直电场时^[4],观察到的是光强度的增加而不是反射光波长的变化。因此,本文采用正性胆甾相液晶。

考虑厚度为 d 的胆甾相液晶 IPS 盒样品(见图 1),其中 $\Delta\epsilon > 0$ 。给液晶盒施加横向电场 E 。假设 E 沿 x 轴方向,液晶分子螺旋轴沿 z 轴方向。另外,螺距为 P ,液晶分子指向矢与 xoy 平面的夹角为预倾角 θ ,长轴与 x 轴之间的夹角为 φ 。IPS 盒为普通 IPS 盒,液晶分子指向矢没有预倾角,即 $\theta = 0$ 。

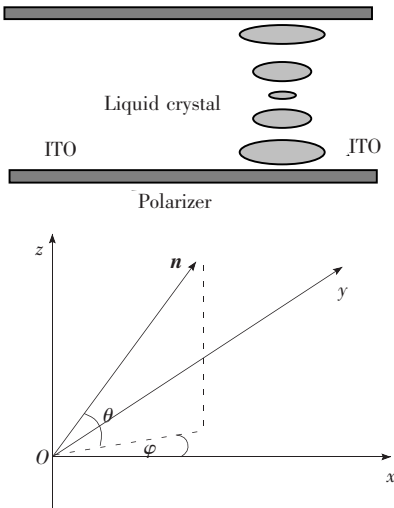


图 1 液晶盒结构及坐标系

Fig. 1 Structure of LC cell and the coordinate system

由于指向矢 n 是位置 z 的函数,因此在假设 z 处液晶分子的扭曲角为 $\varphi(z)$ 的前提下,指向矢可以表示为:

$$n = (\cos\varphi, \sin\varphi, 0) \quad (5)$$

在边界处存在指向矢取向方向,记为 e ,且有 $|e| = 1$ 。假设在 $z=0$ 和 $z=d$ 处, e 均为:

$$e = (1, 0, 0) \quad (6)$$

由式(2)可得胆甾相液晶弹性能密度表达式为:

$$U_{EL} = \frac{1}{2} k_2 \left(\frac{d\varphi}{dz} - q_0 \right)^2 \quad (7)$$

另外,电场 E 沿 x 轴方向,因此可表示为:

$$E = (E, 0, 0) \quad (8)$$

由于胆甾相液晶的各向异性,电位移矢量 D 与场强 E 不是平行的。在实验室坐标系中,液晶的电位移矢量为:

$$D = \epsilon_0 [\epsilon_{\perp} E + \Delta\epsilon n(n \cdot E)] \quad (9)$$

由式(9)可得分量:

$$D_x = \epsilon_0 (\epsilon_{\parallel} \cos^2\varphi + \epsilon_{\perp} \sin^2\varphi) E \quad (10)$$

式中 ϵ_0 为真空介电常数, $\epsilon_{\parallel}$ 和 $\epsilon_{\perp}$ 分别为平行和垂直于分子轴方向的相对介电常数, $\Delta\epsilon = \epsilon_{\parallel} - \epsilon_{\perp}$ 表示介电常数各向异性。于是,由式(3)可得胆甾相液晶静电场能量密度表达式为:

$$U_{ES} = \frac{1}{2} \epsilon_0 \epsilon_{\parallel} E^2 - \frac{1}{2} \epsilon_0 \Delta\epsilon \sin^2\varphi E^2 \quad (11)$$

由于只利用 U_{ES} 对 φ 的微分值求解,因此 U_{ES} 表达式中的常数项,即不含 φ 和 z 的项,可以忽略不计。

另外,若液晶盒表面为弱锚定状态,则根据式(1),单位体积锚定能表达式应为:

$$U_{SW} = -\frac{1}{2} A \cos^2\varphi \cdot \delta(z) - \frac{1}{2} A \cos^2\varphi \cdot \delta(z-d) \quad (12)$$

式中 $\delta(z)$ 表示一维 Dirac- δ 函数。

至此,可以分别得到液晶盒强锚定和弱锚定两种情况下的总自由能密度。强锚定情况下,系统自由能密度为:

$$G = U_{EL} + U_{ES} + U_{SS} = \frac{1}{2} k_2 \left(\frac{d\varphi}{dz} - q_0 \right)^2 - \frac{1}{2} \epsilon_0 \Delta\epsilon \sin^2\varphi E^2 \quad (13)$$

式中 U_{SS} 为强锚定时表面锚定能密度。其值不随外场变化而变化,故可忽略不计。弱锚定情况下,系统自由能密度为:

$$G = U_{EL} + U_{ES} + U_{SW} = \frac{1}{2} k_2 \left(\frac{d\varphi}{dz} - q_0 \right)^2 - \frac{1}{2} \epsilon_0 \Delta\epsilon \sin^2\varphi E^2 - \frac{1}{2} A \cos^2\varphi \cdot \delta(z) - \frac{1}{2} A \cos^2\varphi \cdot \delta(z-d) \quad (14)$$

式中 U_{sw} 为弱锚定时表面锚定能密度, 因随外场变化而变化, 故不可忽略。

系统自由能可以表示为:

$$U = \iint_V G\left(z, \varphi, \frac{d\varphi}{dz}\right) d\Omega = S \int_0^d G\left(z, \varphi, \frac{d\varphi}{dz}\right) dz \quad (15)$$

式中 S 为液晶盒基板表面积, 下文中取为单位面积。可以看出, U 是扭曲角 φ 的泛函。当液晶体系处于平衡态时, U 取最小值。此时可利用使定积分具有最小值的欧拉方程^[21]:

$$\int_0^d \left\{ \frac{\partial G}{\partial \varphi} - \frac{d}{dz} \left[\frac{\partial G}{\partial \left(\frac{d\varphi}{dz} \right)} \right] \right\} \delta\varphi dz + \left[\frac{\partial G}{\partial \left(\frac{d\varphi}{dz} \right)} \delta\varphi \right]_0^d = 0 \quad (16)$$

得到液晶分子指向矢应满足的平衡态方程和边界条件。

以弱锚定情况为例, 将式(15)代入式(16), 可得:

$$\int_0^d \left[-k_2 \frac{d^2\varphi}{dz^2} - \epsilon_0 \Delta\epsilon \cos\varphi \sin\varphi E^2 + A \sin\varphi \cos\varphi \delta(z) + A \sin\varphi \cos\varphi \delta(z-d) \right] \delta\varphi dz + k_2 \left(\frac{d\varphi}{dz} \Big|_{z=d} - q_0 \right) \delta\varphi_d - k_2 \left(\frac{d\varphi}{dz} \Big|_{z=0} - q_0 \right) \delta\varphi_0 = 0 \quad (17)$$

式中 φ_0 是 $z=0$ 处液晶分子长轴与 x 轴的夹角, φ_d 是 $z=d$ 处液晶分子长轴与 x 轴的夹角。施加外场时, φ_0 和 φ_d 随外场的变化而变化。由式(17)可以得到弱锚定情况下液晶系统的平衡态方程和边界条件。

平衡态方程:

$$\epsilon_0 \Delta\epsilon E^2 \sin\varphi \cos\varphi + k_2 \frac{d^2\varphi}{dz^2} = 0 \quad (18)$$

边界条件:

$$A \sin\varphi_0 \cos\varphi_0 = k_2 \left(\frac{d\varphi}{dz} \Big|_{z=0} - q_0 \right) \quad (19)$$

$$-A \sin\varphi_d \cos\varphi_d = k_2 \left(\frac{d\varphi}{dz} \Big|_{z=d} - q_0 \right) \quad (20)$$

由相同步骤可知, 式(18)亦为强锚定情况下系统的平衡态方程, 则强锚定情况下的平衡态方程和边界条件分别为:

平衡态方程:

$$\epsilon_0 \Delta\epsilon E^2 \sin\varphi \cos\varphi + k_2 \frac{d^2\varphi}{dz^2} = 0 \quad (18)$$

边界条件:

$$k_2 \left(\frac{d\varphi}{dz} \Big|_{z=0} - q_0 \right) = 0 \quad (21)$$

$$k_2 \left(\frac{d\varphi}{dz} \Big|_{z=d} - q_0 \right) = 0 \quad (22)$$

5 理论计算

由于无论是强锚定还是弱锚定, 所得到的平衡态方程形式相同, 因此先求解平衡态方程。将式(18)进行化简, 可以得到:

$$\epsilon_0 \Delta\epsilon E^2 \sin^2\varphi + k_2 \left(\frac{d\varphi}{dz} \right)^2 = c^2 \quad (23)$$

式中 c 为常数, 其值可由边界条件确定。

将式(23)移项, 可得:

$$k_2 \left(\frac{d\varphi}{dz} \right)^2 = -\epsilon_0 \Delta\epsilon E^2 \sin^2\varphi + c^2 \quad (24)$$

$\frac{d\varphi}{dz}$ 的符号取决于液晶分子的旋转方向, 即扭曲角 $\varphi(z)$ 随 z 的变化情况。假设液晶分子左旋, 即 $\varphi(z)$ 随 z 的增大而增大, 可得 $\frac{d\varphi}{dz} > 0$, 上式可化为:

$$dz = \sqrt{\frac{k_2}{c^2}} \frac{1}{\sqrt{1 - k^2 \sin^2\varphi}} \cdot d\varphi \quad (25)$$

式中 $k^2 = \frac{\epsilon_0 \Delta\epsilon E^2}{c^2}$ 。积分可得:

$$P = 4 \sqrt{\frac{k_2}{c^2}} \int_0^{\pi/2} \frac{1}{\sqrt{1 - k^2 \sin^2\varphi}} d\varphi = 4 \sqrt{\frac{k_2}{c^2}} E_1(k) \quad (26)$$

式中 $E_1(k)$ 为第一类完全椭圆积分, 其值可调用 Matlab 计算软件中的 Ellipke 函数进行计算。式(26)即为螺距 P 与电场强度 E 之间的关系式。

根据式(26)及第一类椭圆积分的性质, 当 $k \rightarrow 1$ 时, $P \rightarrow \infty$, 此时对应的场强为饱和场强 E_s , 由 k 的定义式立即可得:

$$E_s = c \sqrt{\frac{1}{\epsilon_0 \Delta\epsilon}} \quad (27)$$

式(26)为强锚定和弱锚定两种情况下螺距 P 与电场强度 E 之间的关系式。虽然两种情况下的关系式形式相同, 但是式中参数 c 和 k 由两种情况下的边界条件决定, 边界条件不同, c 和 k 的取值不同, P 与 E 的关系也不同。下面具体讨论两种锚定情况下螺距 P 与电场强度 E 之间的关系。

5.1 强锚定情况

强锚定情况下, 平衡态方程为式(18), 边界条

件为式(21)和(22)。螺距与电场强度之间关系式由式(26)给出。下面通过计算确定参数 c 和 k 的

取值。

强锚定时,液晶盒系统平均自由能密度为:

$$U = \frac{2}{P} \int_0^{P/2} \left[-\frac{1}{2} \epsilon_0 \Delta \epsilon \sin^2 \varphi \cdot E^2 + \frac{1}{2} k_2 \left(\frac{d\varphi}{dz} - q_0 \right)^2 \right] dz = \frac{4}{P} \int_0^{\pi/2} \left[-\frac{1}{2} \epsilon_0 \Delta \epsilon \sin^2 \varphi E^2 + \frac{1}{2} k_2 \left(\frac{d\varphi}{dz} - q_0 \right)^2 \right] \frac{dz}{d\varphi} d\varphi \quad (28)$$

将式(25)代入上式并进行整理,可得:

$$U = \frac{2\Delta\epsilon\epsilon_0 E^2}{P} \xi_m \left[\left(\xi_m^2 q_0^2 k - \frac{1}{k} \right) E_1(k) - q_0 \xi_m^2 \pi + \frac{2}{k} E_2(k) \right] \quad (29)$$

式中 $E_2(k) = \int_0^{\pi/2} \sqrt{1 - k^2 \sin^2 \varphi} d\varphi$ 为第二类完全椭圆积分, $\xi_m = \sqrt{\frac{k_2}{\Delta\epsilon\epsilon_0 E^2}}$ 。推导过程中已利用恒等式 $\sin^2 \varphi = \frac{1}{k^2} - \frac{1 - k^2 \sin^2 \varphi}{k^2}$ 对公式进行化简。

系统处于平衡态时,系统平均自由能密度 U 对 k 取最小值,即有 $\frac{\partial U}{\partial k} = 0$ 。在此方程中,所求参数 c 为自变量,方程表达式为:

$$\left(\xi_m^2 q_0^2 + \frac{1}{k^2} \right) E_1(k) + \left(\xi_m^2 k q_0^2 - \frac{1}{k} \right) \frac{dE_1(k)}{dk} + 2 \frac{d}{dk} \left[\frac{E_1(k)}{k} \right] = 0 \quad (30)$$

求解式(30),可得:

$$c = \frac{2\pi}{P_0} \sqrt{k_2} \quad (31)$$

计算过程中利用了 $\frac{d}{dk} \left[\frac{E_1(k)}{k} \right] = -\frac{1}{k^2} E_1(k)$ 进行化简。

理想强锚定情况下的锚定系数为无穷大,基板处指向矢始终不随电场变化^[22]。此时,由边界条件式(21)和(22)可知:

$$\left. \frac{d\varphi}{dz} \right|_{z=0} = \left. \frac{d\varphi}{dz} \right|_{z=d} \quad (32)$$

由此可知:

$$\varphi_d = \varphi_0 + \phi \quad (33)$$

式中, ϕ 为常数。 ϕ 的值可根据液晶盒表面的处理定义。由于假设在 $z=0$ 和 $z=d$ 处,指向矢易取向方向相同,因此 $\phi = m\pi$, 于是:

$$\varphi_d = \varphi_0 + m\pi \quad (34)$$

盒厚 d 与螺距 P 之间满足以下关系:

$$d = m \frac{P}{2} \quad (35)$$

式(35)为强锚定情况下螺距必须满足的条件。由式(31)和 k 的定义式可以确定某一电场强

度下的 k 值。将所得 k 值代入式(26),并与式(35)联立,可得:

$$m = \frac{\pi d}{P_0} \frac{1}{E_1(k)} \quad (36)$$

式中 d 和 P_0 为材料参数,是已知参数。因此,式(36)给出了电场强度 E 和常数 m 之间的关系。

给定电场强度 E 后,根据 k 的定义式,可确定 k 的值,代入式(36)可进一步确定 m 的值。 m 值确定后,代入式(35),即可得相应螺距值 P 。由于 m 只取整数,因此液晶螺距 P 随电场强度 E 呈现离散式变化。

在实际情况下,液晶盒基板上的锚定系数并非无限大,即锚定系数为有限值,当电压大于一定值时,基板处指向矢将发生变化,此时强锚定情况在一定程度上转化为弱锚定情况。

5.2 弱锚定情况

式(18)和(26)同样适用于弱锚定情况。此情况下,边界条件为式(19)和(20)。当 $d=0$ 时, $\varphi = \varphi_0$, 代入式(23)得:

$$\epsilon_0 \Delta \epsilon E^2 \sin^2 \varphi_0 + k_2 \left(\frac{d\varphi}{dz} \right)^2 \Big|_{z=0} = c^2 \quad (37)$$

另一方面,由式(19)可得:

$$\left. \frac{d\varphi}{dz} \right|_{z=0} = \frac{A}{k_2} \sin \varphi_0 \cos \varphi_0 + q_0 \quad (38)$$

将式(38)代入式(37)得:

$$\epsilon_0 \Delta \epsilon E^2 \sin^2 \varphi_0 + \frac{A^2}{4k_2} \sin^2 2\varphi_0 + A q_0 \sin 2\varphi_0 + k_2 q_0^2 = c^2 \quad (39)$$

式中 $z=0$ 表面处的扭曲角 φ_0 可以由实验测得^[23],为已知值。式(39)为弱锚定时场强 E 、锚定系数 A 及胆甾相液晶本征螺距 P_0 与常数 c 之间的关系。将式(39)代入式(26),即可得到弱锚定情况下 P 随 E 的变化关系。可以看到:与强锚定情况不同,弱锚定时液晶螺距 P 随电场强度 E

连续变化,变化关系由式(26)和(39)给出,且锚定强度 A 的大小会影响 P 随电场强度 E 的变化。

至此,已从理论推导得出了强与弱两种锚定情况下,螺距 P 随电场强度 E 的变化关系式。强锚定情况下,螺距 P 随电场强度 E 离散变化;弱锚定情况下,螺距 P 随电场强度 E 连续变化,锚定强度 A 直接影响 P 随 E 的变化。接下来进行相应的数值计算。

6 数据代入和讨论

计算中所采用的液晶材料参数值^[15]如下: $P_0=300\text{ nm}$, $n_o=1.5$, $n_e=1.8$, $d=3\ 000\text{ nm}$ 。入射光为平行于螺旋轴方向的右旋圆偏振光。 $A=1\times 10^{-6}\text{ J/m}^2$, $k_2=8.0\times 10^{-12}\text{ N}$, $\epsilon_0\Delta\epsilon=4.7\epsilon_0$ 。将参数代入式(27),可分别得到两种锚定情况下胆甾相液晶-向列相液晶转变的饱和电场强度 E_s 。强锚定情况下, $E_s=9.182\ 9\text{ V/}\mu\text{m}$;弱锚定情况下, $E_s=9.183\ 3\text{ V/}\mu\text{m}$ 。表 1 和表 2 分别给出强锚定和弱锚定情况下的计算数据及结果。

由表 1 及图 2 可以看到:由于整数 m 只能取一定的离散值,因此,强锚定情况下,液晶螺距随电场离散变化。当电场达到某一临界值时,螺距会发生跃变。液晶盒厚 d 为固定值,因此,根据式(35)可知, m 取值确定时,液晶螺距值为定值,不随电场变化。但是,电场中螺距亦不能突然发生变化。电场连续变化时,螺距 P 的大小不变,但是,液晶分子指向矢随电场的增加,而逐渐转向

表 1 强锚定情况下的计算数据
Table 1 Computational data under the strong anchoring condition

m	k	$E(\text{V}/\mu\text{m})$	$P(\text{nm})$	$\lambda(\text{nm})$
20	0.000 0	0.000	300.0	495.0
19	0.433 2	3.978	315.8	512.1
18	0.592 9	5.445	333.3	550.0
17	0.702 0	6.446	352.9	582.4
16	0.782 8	7.188	375.0	618.8
15	0.844 2	7.752	400.0	660.0
14	0.891 1	8.183	428.6	707.1
13	0.926 6	8.509	461.5	761.5
12	0.953 0	8.751	500.0	825.0
11	0.971 7	8.923	545.4	899.9
10	0.984 4	9.040	600.0	990.1

电场的方向。随电场的增加,这种变化的程度也逐渐增加。当电场达到临界值时,变化亦达到一定程度,螺距即发生跃变。

表 2 弱锚定情况下的计算数据,锚定强度 $A=1\times 10^{-6}\text{ J/}\mu\text{m}$

$E(\text{V}/\mu\text{m})$	k	$P(\text{nm})$	$\lambda(\text{nm})$
0	0	300.0	495.0
0.5	0.005 4	300.2	495.4
1.0	0.108 9	300.9	496.5
1.5	0.163 3	302.0	498.4
2.0	0.217 8	303.7	501.0
2.5	0.272 2	305.8	504.6
3.0	0.326 7	308.5	509.1
3.5	0.381 1	311.9	514.6
4.0	0.435 6	316.0	521.4
4.5	0.490 0	320.9	529.5
5.0	0.544 5	326.9	539.4
5.5	0.598 9	334.2	551.4
6.0	0.653 4	343.1	566.2
6.5	0.707 8	354.3	584.5
7.0	0.762 3	368.5	608.1
7.5	0.816 7	387.6	639.5
8.0	0.871 2	415.0	684.7
8.5	0.925 6	460.3	759.5
9.0	0.980 1	577.1	952.3

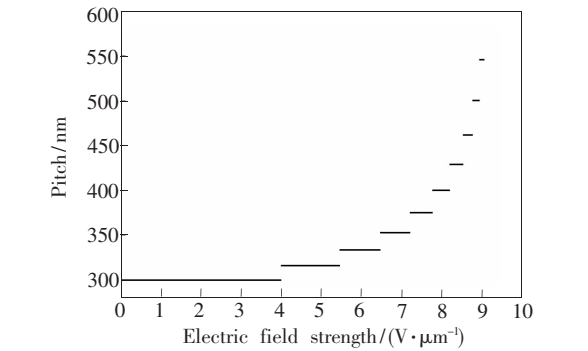


图 2 强锚定情况下,液晶螺距 P 与电场强度 E 之间的变化曲线。
Fig. 2 Pitch P versus the electric field strength E under the strong anchoring condition

锚定情况的不同限定了平衡态方程边界条件的不同,使得强弱两种锚定情况下的方程解在连续性上有本质区别。弱锚定情况下液晶螺距可随电场连续变化,而强锚定情况下液晶螺距只能随电场离散变化。图 3 为弱锚定情况下的 P 随 E 连续变化的曲线。

由表 3 中的数据可以看到:锚定强度对螺距随电场变化关系的影响并不十分显著。图 4 中, $A=1\times 10^{-6}\text{ J/m}^2$ 与 $A=1\times 10^{-5}\text{ J/m}^2$ 时,螺距与电场强度的变化曲线几乎完全重叠,因此在图中画出 $A=1\times 10^{-5}\text{ J/m}^2$ 的变化曲线。 $A=1\times 10^{-4}\text{ J/m}^2$ 时,变化曲线有一定的偏移,但是偏离很小。这是由于弱锚定情况下,表面扭曲角 φ_0 本身就很很小,而且所用模型中液晶盒外加电场的方向沿易取向方向。这两个因素使 φ_0 很接近于零,即表面液晶分子指向矢接近于沿易取向方向排列。也就是说,外加电场增强了液晶盒基板表面的锚定程度,这使得锚定强度对螺距随电场变化关系的影响并不十分显著。

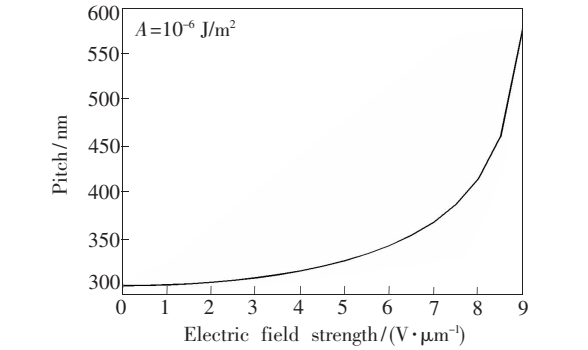


图 3 弱锚定情况下,螺距 P 与电场强度 E 之间的变化曲线。

Fig. 3 Pitch P versus the electric field strength E under the weak anchoring condition

表 3 弱锚定情况下,液晶螺距 P 与电场强度 E 、锚定强度 A 之间的关系

Table 3 Pitch P under different electric field E and different anchoring coefficient A

$A(\text{J/m}^2)$	$E(\text{V}/\mu\text{m})$	$P(\text{nm})$
10^{-6}	6.0	343.13
10^{-6}	5.5	334.20
10^{-5}	6.0	343.09
10^{-5}	5.5	334.15
10^{-4}	6.0	334.15
10^{-4}	5.5	341.66

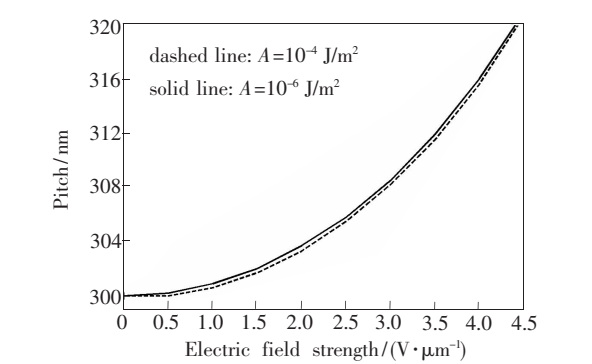


图 4 A 取不同值时,螺距与电场强度之间的变化曲线。

Fig. 4 Pitch P versus the electric field strength E as the anchoring coefficient is different under the weak anchoring condition

7 结 论

在强锚定与弱锚定两种情况下,利用热力学平衡时系统自由能最小的原理,得出了胆甾相液晶螺距随电场变化的关系式。结合 Matlab 软件得到计算所需数值,证明了可以通过电场调谐胆甾相液晶螺距 P 及反射光波长 λ 。

将式(31)和(39)分别代入式(26)并进行对比,结果发现:

(a)电场可以调谐胆甾相液晶的螺距。电场强度 E 增大时,螺距 P 值变大,从而引起反射光波长 λ 增大,发生红移;

(b)强锚定情况下,螺距 P 随电场强度 E 离散变化,电场连续变化时,螺距会发生阶梯跳跃变化;

(c)弱锚定情况下,螺距 P 随电场强度 E 连续变化。电场强度连续增大时,螺距 P 单调递增;

(d)弱锚定情况下,锚定系数 A 大小的变化会影响 P 随 E 的变化关系。锚定系数越大, P 与 E 之间的关系曲线变化越缓和;锚定系数越小, P 与 E 之间的关系曲线变化越陡峭。

在强锚定与弱锚定情况下,螺距 P 与电场强度 E 之间的变化关系不同。这是由于,液晶盒基板为理想强锚定处理时,锚定强度为无穷大,基板处指向矢固定在易取向方向,不随电场变化。而基板为弱锚定处理时,锚定系数较小,基板处指向矢可随电场变化。

强锚定是一种理想情况。实际场合中,即使

在所谓“强锚定”情况下,锚定系数也为有限值(这实际上是弱锚定中锚定强度比较强的情况)。这就导致当电场连续变化时,除了理想的强锚定边

界情况外,胆甾相液晶的螺距都可不同程度地随电场连续变化。因此,在理论上利用横向电场调谐胆甾相液晶反射光的颜色是可行的。

参 考 文 献:

- [1] Yang D K, West J L, Chien L C, *et al.* Control of reflectivity and bistability in displays using cholesteric liquid crystals [J]. *J. Appl. Phys.*, 1994, 76(2):1331-1333.
- [2] Taheri B, Munoz A F, Palffy-Muhoray P, *et al.* Low threshold lasing in cholesteric liquid crystals[J]. *Mol. Cryst. Liq. Cryst.*, 2001, 358: 73-82.
- [3] Hochbaum A, Jiang Y, Li L, *et al.* Cholesteric color filters: optical characters, light recycling, and brightness enhancement [C]//*SID'99 Digest*, San Jose, USA, SID, 1999:1063-1065.
- [4] Harper W J. Voltage effects in cholesteric liquid crystals [J]. *Mol. Cryst.*, 1966, 1:325-332.
- [5] Hansen J R, Schneeberger R J. Liquid crystal media for electron beam recording [J]. *IEE Trans. on Electron Dev.*, 1968, 15(11):896-906.
- [6] de Gennes P G. Calculation of the distortion of a cholesteric structure by a magnetic field [J]. *Solid State Commun.*, 1968, 6(3):163-170.
- [7] Meyer R B. Effects of electric and magnetic fields on the structure of cholesteric liquid crystals[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1968, 12(9):281-282.
- [8] Meyer R B. Distortion of a cholesteric structure by a magnetic field [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1969, 14(7): 208-209.
- [9] Kahn F J. Electric-field-induced color changes and pitch dilation in cholesteric liquid crystals [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1970, 24(5):209-212.
- [10] Belyaev S V, Blinov L M. Step unwinding of a spiral in a cholesteric liquid crystal [J]. *JETP. Lett.*, 1979, 30(2): 99-103.
- [11] 荆海, 陈明, 袁建峰, 等. 无色移共面转换液晶显示[J]. 液晶与显示, 1999, 14(2): 115-119.
- [12] Li Z, Desai P, Akins R, *et al.* Electrically tunable color for full-color reflective displays [J]. *Proc. of SPIE*, 2002, 4658(7): 7-13.
- [13] Xianyu H Q, Faris S, Crawford G P. In-plane switching of cholesteric liquid crystals for visible and near-infrared applications[J]. *Appl. Opt.*, 2004, 43(26):5006-5014.
- [14] 范志新, 于天池, 黄欢, 等. 胆甾相液晶电控螺旋畸变导致的布拉格反射特性 [J]. 光学学报, 2008, 28(4): 744-748.
- [15] 邓罗根, 赵找栗. 横向电场对平面织构胆甾相液晶螺距及反射特性的影响 [J]. 物理学报, 2009, 58(11): 7773-7780.
- [16] Rapini A, Papoular M. Distortion dune lamella nematique sous champ magnetic [J]. *J. Phys. Colloq. (Paris)*, 1969, 30: C4-54.
- [17] Jerome B. Liquid crystals; Surface effects and anchoring [J]. *Rep. Prog. Phys.*, 1991, 54: 391-452.
- [18] De Gennes P G, Prost J. *The Physics of Liquid Crystals* [M]. New York: Oxford University Press, 1993: 287.
- [19] Zhou Ying, Huang Yu, Wu Shin-Tson. Enhancing cholesteric liquid crystal laser performance using a cholesteric reflector [J]. *Opt. Express*, 2006, 14(9):3906-3916.
- [20] 朱文芳, 孙玉宝, 张志东. 共面转换液晶显示器的饱和电压 [J]. 现代显示, 2003, (6): 45-47.
- [21] 范志新. 液晶器件工艺基础 [M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 2000: 49-54.
- [22] 张志东, 徐世维, 黄锡珉. 弱锚定边界条件下的 Freedericksz 转变[J]. 液晶与显示, 1996, 11(3):212-217.
- [23] 刘绍锦, 宋玉龙, 张俊瑞, 等. 改进的极向锚定强度测量方法[J]. 液晶与显示, 2006, 21(1):15-18.