

文章编号: 0253-2239(2009)02-0443-05

弱磁场中向列相液晶的磁光效应

陈 婷 冯仕猛

(上海交通大学物理系, 上海 200240)

摘要 当外磁场强度比较小时, 液晶不会发生 Freedericksz 转变。利用介电张量分析了扭曲型向列液晶在弱磁场中的旋光效应。通过理论分析表明, 线性偏振光经过磁场中的扭曲型向列液晶, 会产生左右两束椭圆偏振光。这两束椭圆偏振光在该液晶中的传播速度不同, 导致光经过液晶盒后光电场振动面发生偏转。进一步分析表明, 对于同一种波长的光, 磁场强度越大, 其电场振动面旋转角度越大。在相同的磁场强度下, 光波长越短, 其电场振动面旋转角度越大。如果加上高的偏置电压, 使向列型液晶分子长轴方向与外磁场方向平行, 线性偏振光经过磁场中的该扭曲型向列液晶, 其振动面也会发生偏转。

关键词 材料; 液晶; 磁场; 旋光效应

中图分类号 O734 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS20092902.0443

Magnetic-Optics Effect of Nematic Liquid Crystal in Weak Magnetic Field

Chen Ting Feng Shimeng

(Physics Department, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

Abstract The structure of twisted nematic liquid crystal does not change under weak magnetic field. The rotation of polarization of light in the twisted nematic liquid crystal with the applied weak magnetic field is analyzed using the dielectric rate tensor. The theoretical results show that linearly polarized light transmitting this liquid crystal can produce left-hand and right-hand elliptically polarized light, which corresponds to the different speed of propagation. This leads to the rotation of polarization of light when it passes through this liquid crystal. A method to calculate rotation angle which results from the combination of the left-hand and right-hand elliptically polarized light is given. The dependence of the transmitted ratio of light on the applied magnetic field is founded. Under the same wavelength of light, the more intense the magnetic field strength, the larger the rotated angle of polarization of light. At the same magnetic field strength, the shorter the wavelength of light, the larger the rotated angle of polarization of light. When the directors of liquid crystal are parallel to the direction of the magnetic field, the polarization rotation of light can also be observed.

Key words materials; liquid crystal; magnetic field; magnetic optics effects

1 引 言

液晶分子排列并不像晶体分子的排列那样牢固, 所以很容易受到电场、磁场、温度、应力以及吸附杂质等的外部刺激的影响, 从而使其光学性质发生变化, 使液晶有广泛的用途^{1,2}。液晶最突出的特性之一就是可以通过外加电场或磁场来控制指向矢的方向, 也就是说可以通过外加电场或磁场来控制液晶层内光轴的分布, 从而控制穿过液晶层的偏振光的状态。当对液晶盒加上外部磁场时, 在不同的磁场

强度作用下, 会使分子的长轴发生不同的倾角旋转。

液晶的磁效应有种, 一是液晶体外部加上磁场时, 在强磁场的作用下会使分子长轴发生倾角旋转, 从而改变出射光的偏振态。液晶中加外磁场后不存在液晶 Freedericksz 转变的起始电压, 但液晶的双折射率之差要发生改变^[3]; 任广军^[4,5]研究了磁场强度与液晶空间排列的关系, 发现磁场强度大于 400 mT 时, 扭曲型向列液晶分子就发生 Freedericksz 转变, 胡西多等利用平均场理论也进行过相关的研究^[6,7]。

收稿日期: 2008-02-18; 收到修改稿日期: 2008-05-20

作者简介: 陈 婷(1986—), 女, 硕士研究生, 主要从事液晶光学的研究。E-mail: ctsjsj@sjtu.edu.cn

导师简介: 冯仕猛(1964—), 男, 副教授, 主要从事短波光学、液晶光学研究。E-mail: smfeng@sjtu.edu.cn

第二种是当外部磁场强度不大时,液晶分子的指向矢不会改变,也就是不改变液晶内部分子排列方式,但磁场会影响液晶介电张量。H. Khoshsima 等测量了不同磁场强度下液晶极化率^[8],但尚未对光偏振态的影响作进一步深入研究。本文以加磁场后液晶介电张量为基础,分析了在外磁场的作用下线偏振光在液晶中的传播特性,发现磁场即便是不改变液晶结构,仍会导致光电场振动面的旋转,这对于液晶磁光效应的研究是有意义的。

2 理论推导

向列扭曲型液晶可以被当作 N 层双折射材料,即被视为 N 层晶片的叠合而成。每层的光轴相对于相邻的晶片有一个小的旋转。在每一层晶片内其光轴方向可以看成是一个常矢量,如图 1 所示。图中棒长的方向表示最大折射率方向。 z 轴表示光传播方向。 \mathbf{H} 表示磁场强度方向。对于扭曲型向列相液晶,当在液晶上加纵向磁场(或电压)时,其介电张量为^[9~11]

$$\epsilon = \begin{bmatrix} \epsilon_x & i\epsilon_0 \chi_x B_z & 0 \\ -i\epsilon_0 \chi_y B_z & \epsilon_y & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_z \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中 ϵ_x, ϵ_y 表示 x, y 方向介电常数, ϵ_0 为真空中的介电常数, B_z 为 z 方向的磁场强度, χ_x, χ_y 为电极化率。根据菲涅尔方程

$$\mathbf{D} = \frac{n^2}{\mu c^2} [\mathbf{E} - \mathbf{S}(\mathbf{S} \cdot \mathbf{E})] = \begin{bmatrix} \epsilon_x & i\chi_x B_z & 0 \\ -i\chi_y B_z & \epsilon_y & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_z \end{bmatrix} \mathbf{E}, \quad (2)$$

式中 \mathbf{D} 表示电位移矢量, n 为折射率, μ 为相对磁导率, c 为光在真空中的传播速度, \mathbf{E} 为电场强度矢量, \mathbf{S} 为相位传播方向。把(2)式处理后得

$$\begin{bmatrix} \epsilon_x & i\chi_x B_z & 0 \\ -i\chi_y B_z & \epsilon_y & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \\ E_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n^2 & 0 & 0 \\ 0 & n^2 & 0 \\ 0 & 0 & n^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

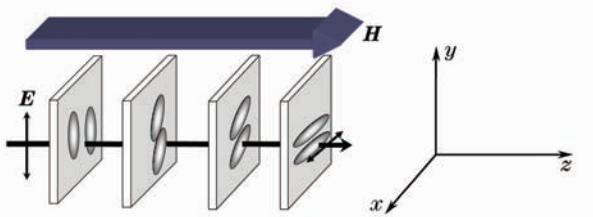


图 1 扭曲型向列液晶结构图

Fig. 1 Mode of twisted nematic liquid crystal

从(3)式可以看出,电磁波在 z 轴方向传播,其 z 方向电场必须为

$$E_z = 0,$$

E_x, E_y 电场分量可由(3)式得

$$\begin{bmatrix} \epsilon_x & i\chi_x B_z \\ -i\chi_y B_z & \epsilon_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n^2 & 0 \\ 0 & n^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix}, \quad (4)$$

因为 x, y 方向一定存在电场分量,所以必然存在

$$\begin{vmatrix} \epsilon_x - n^2 & i\chi_x B_z \\ -i\chi_y B_z & \epsilon_y - n^2 \end{vmatrix} = 0, \quad (5)$$

求解该行列式得

$$(n^2 - \epsilon_x)(n^2 - \epsilon_y) - \chi_x \chi_y B_z^2 = 0, \quad (6)$$

利用 $(1+x)^{1/2} \approx 1 + \frac{1}{2}x$, 可以由(6)式得到

$$\begin{cases} n_1^2 = \epsilon_x + kB_z^2 \\ n_2^2 = \epsilon_y - kB_z^2 \end{cases}, \quad k = \frac{\chi_x \chi_y}{\epsilon_x - \epsilon_y}, \quad (7)$$

把 $n_1 = \sqrt{\epsilon_x + kB_z^2}$ 代入(5)式得

$$\begin{bmatrix} \epsilon_x - (\epsilon_x + kB_z^2) & i\chi_x B_z \\ -i\chi_y B_z & \epsilon_y - (\epsilon_x + kB_z^2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} = 0, \quad (8)$$

将(8)式进一步处理后得到

$$\begin{cases} \frac{\chi_y}{\epsilon_x - \epsilon_y} B_z E_x = iE_y \\ \frac{\chi_x B_z E_x}{\epsilon_x - \epsilon_y} = \left[1 + \frac{\chi_x \chi_y}{(\epsilon_x - \epsilon_y)^2} B_z^2 \right] iE_y \end{cases}, \quad (9)$$

考虑到 $\frac{\chi_x \chi_y}{(\epsilon_x - \epsilon_y)^2} B_z^2$ 是非常小的量,(9)式可以简化为

$$\begin{cases} c = id \\ c \approx id \end{cases}, \quad \begin{cases} c = \chi_y B_z E_x / (\epsilon_x - \epsilon_y) \\ d = E_y \end{cases}, \quad (10)$$

同样地,把 $n_2 = \sqrt{\epsilon_y - kB_z^2}$ 代入(5)式得到

$$\begin{cases} ia = b \\ ia = b' \end{cases}, \quad \begin{cases} a = E_x \\ b = \chi_x B_z E_y / (\epsilon_x - \epsilon_y) \end{cases}, \quad (11)$$

(10)和(11)式表明,当一束线性偏振动光进入磁场中的液晶,能产生左旋和右旋椭圆偏振光,对应传播模型如图 2 所示,其椭圆方程分别为

$$\frac{x^2}{c^2} + \frac{y^2}{d^2} = 1, \quad (12)$$

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1, \quad (13)$$

对于左-右旋椭圆偏振光,当经过一层液晶片后,其电场矢量的旋转角度为分别为 φ_1, φ_2

$$\varphi_1 = \frac{2\pi(\sqrt{\epsilon_x + 2kB_z^2} - \sqrt{\epsilon_x})d}{\lambda}, \quad (14)$$

$$\varphi_2 = \frac{2\pi(\sqrt{\epsilon_y - 2kB_z^2} - \sqrt{\epsilon_y})d}{\lambda}, \quad (15)$$

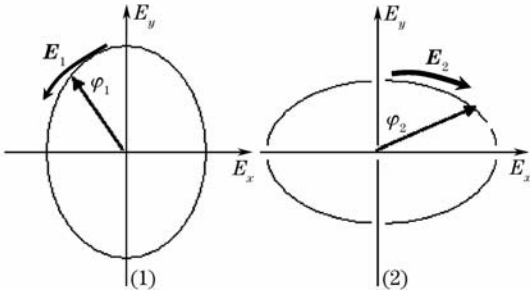


图 2 光在磁场中的扭曲型向列液晶传播时,产生左旋和右旋偏振光矢量图

Fig. 2 Left and right hand circularly polarized light when the linearly-polarized light spreads in the twisted nematic liquid crystal applied with the magnetic field

式中 d 为单个晶体片的厚度。利用

$$x = E_1 \cos \varphi_1, \quad y = E_1 \sin \varphi_1$$

和椭圆方程,则图 2 中左旋和右旋椭圆偏振光电场矢量为

$$\mathbf{E}_1 = \frac{ab}{\sqrt{b^2 \cos^2 \varphi_1 + a^2 \sin^2 \varphi_1}}, \quad (16)$$

$$\mathbf{E}_2 = \frac{cd}{\sqrt{d^2 \cos^2 \varphi_2 + c^2 \sin^2 \varphi_2}}, \quad (17)$$

根据电场矢量叠加原理(见图 3),经过第一层液晶片后总电场矢量为

$$\mathbf{E} = \left[\frac{a^2 b^2}{b^2 \cos^2 \varphi_1 + a^2 \sin^2 \varphi_1} + \frac{c^2 d^2}{c^2 \cos^2 \varphi_1 + c^2 \sin^2 \varphi_1} + 2 \frac{ab}{\sqrt{b^2 \cos^2 \varphi_2 + a^2 \sin^2 \varphi_2}} \times \frac{cd}{\sqrt{c^2 \cos^2 \varphi_2 + d^2 \sin^2 \varphi_2}} \cos(\varphi_2 - \varphi_1) \right]^{1/2}, \quad (18)$$

因为 $\mathbf{E}_1 \neq \mathbf{E}_2$, 图 3 中总电场的旋转角度 φ 为

$$\varphi = \arctan \frac{E_1 \sin \varphi_1 + E_2 \sin \varphi_2}{E_1 \cos \varphi_1 + E_2 \cos \varphi_2}. \quad (19)$$

如果是没有磁场存在,螺旋结构液晶相当于波导器件,线性偏振光在螺旋结构的液晶中传播时,电场随晶片长轴旋转而旋转。如果在液晶的 z 轴方向上加上磁场,则穿过该液晶的光多了附加相位 φ ,则进入第二层晶体片电场为

$$\mathbf{E}_{2L} = \mathbf{E} \cos \varphi, \quad (20)$$

式中 \mathbf{E}_{2L} 代表进入第二层晶体片的电场强度,同理进入第三层晶体片的电场强度为

$$\mathbf{E}_{3L} = \mathbf{E}_{2L} \cos \varphi = \mathbf{E} \cos^2 \varphi,$$

如果液晶层为 N ,则经过该层液晶后的电场强度为

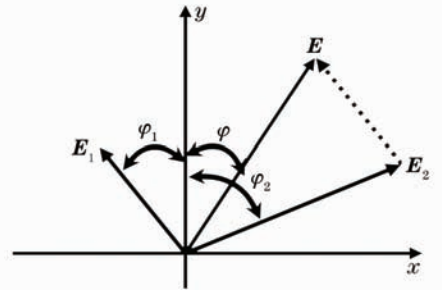


图 3 经过一层液晶片后左右旋偏振光电场矢量合成模型

Fig. 3 Adding mode of electric field vector for left-right circularly polarized light through the first layer liquid crystal

$$\mathbf{E} \mathbf{E}_{NL} = \mathbf{E} \cos^{N-1} \varphi. \quad (21)$$

在液晶盒两边加上两个相互平行的偏振片(图 1),进入液晶盒是 x 方向线偏振光,经过液晶盒后出来的光是 y 轴方向的偏振光,因为与第二个偏振片偏振化方向平行,所以光能够完全透过。如果在液晶的 z 轴方向上加上磁场,则透过第二偏振片的光强度为

$$I_{\text{out}} = I \cos^{2(N-1)} \varphi, \quad T = \frac{I_{\text{out}}}{I} = \cos^{2(N-1)} \varphi, \quad (22)$$

式中 I 为没有加磁场时光透过液晶的光强度, I_{out} 为加了磁场后透过液晶盒的光强度, T 为透射系数。当在液晶盒的两端加上高电压时,液晶长轴的方向与磁场的方向平行,在这样的情况下 $\epsilon_y = \epsilon_x$,由(14)得到^[7]

$$\varphi = \frac{4\pi k B_z^2 N d}{\lambda}, \quad (23)$$

式中 φ 为光通过液晶后电场总的旋转角度。同样,在液晶盒两边加上两个相互垂直的偏振片,进入液晶盒是 x 方向线偏振光,经过液晶盒后出来的光是 y 轴方向的偏振光。因为与第二个偏振片偏振化方向平行,所以光能够完全透过。如果在液晶的 z 轴方向上加上磁场,则透过第二个偏振片光强度为

$$E_{\text{out}} = E \cos \varphi, \quad (24)$$

和

$$I_{\text{out}} = I \cos^2 \varphi, \quad T = I_{\text{out}}/I = \cos^2 \varphi. \quad (25)$$

对于普通扭曲型向列液晶,其结构参数为:单层晶片厚度 0.35 nm,扭曲型向列液晶总厚度 2 μm ,棒长方面折射率 1.7,棒短方向折射率 1.5, $\chi = 7 \times 10^{-7}$ 。将这些参数代到上面系列公式中,然后由(22)和(25)式分别得到图 4 和图 5。

从图 4 中可以看出,当磁场强度很小时,扭曲型

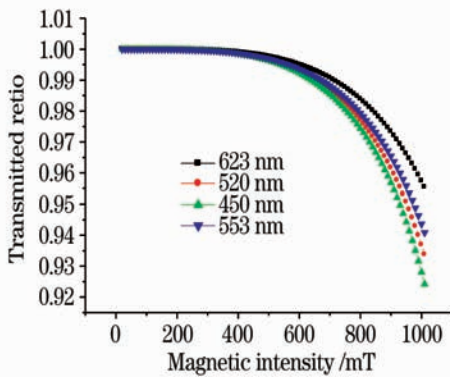


图 4 不同波长的光在扭曲型向列液晶在不同磁感应场强度下透射比

Fig. 4 Transmitted ratio of different wavelength light in the twisted nematic liquid crystal under different magnetic intensities

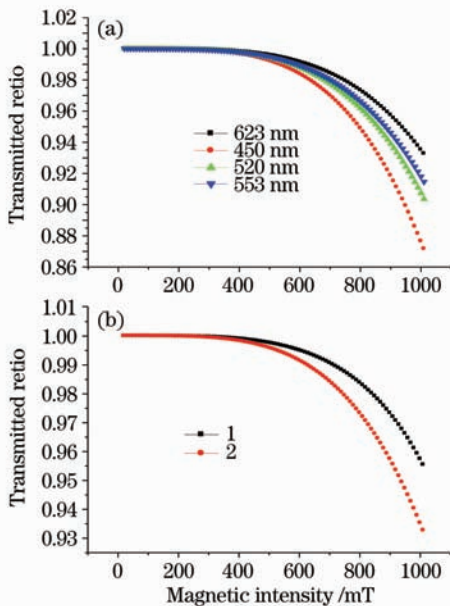


图 5 扭曲型向列液晶在高压和不同磁感应强度下不同波长光的透射比

Fig. 5 Transmitted ratio of different wavelength light in the twisted nematic liquid crystal under high voltage and different magnetic intensities

向列液晶透射率近似为 1, 即基本观察不到磁光效应。当磁场强度大于 200 mT 时, 光的透射率开始变小, 随着磁场强度增加, 光的透射强度逐渐变小。对于同一种波长的光, 磁场强度越大, 光的透射率越小。例如, 如当波长为 450 nm, 在磁场强度为 600 mT 时透射率为 0.99, 而磁场强度增加到 800 mT 时, 透射率为 0.945。这些数据说明其电场振动面旋转角度越大。进一步研究发现, 在相同的磁场强度下, 光波长越短, 其电场振动面旋转角度越大。例如, 为当磁场强度为 500 mT 时, 波长为

623 nm 的光透射率为 0.996, 而波长为 450 nm 的光透射率为 0.990。说明短波长的光在磁场中磁光效应越明显。从图 5(a) 也能发现与上面相同的规律, 不同的是在相同磁场强度下, (25) 式得到透射率要小。为了方便比较, 把液晶相关结构参数和波长 623 nm 分别代入 (22) 和 (25) 式, 得到曲线如图 5(b) 所示。

图 5(b) 中曲线 1 与 (22) 式相对应, 曲线 2 与 (25) 式相对应。在相同的磁场强度下, 由 (25) 式得到曲线 2 显示光透射率更低, 说明液晶在较高的外加电压作用下, 液晶分子与外磁场方向平行时, 磁光效应更明显。也就说明在相同的磁场强度下, 光电场振动面在液晶呈扭曲状态时旋转角度小于液晶为非扭曲状态时旋转角度。

3 结 论

扭曲型向列液晶在弱外磁场中不发生 Freedericksz 转变, 线性偏振光经过磁场中的该向列液晶时其振动面会发生偏转。对于同一种波长的光, 磁场强度越大, 其电场振动面旋转角度越大。在相同的磁场强度下, 光的波长越短, 其电场振动面旋转角度越大。如果外加高偏置电压, 使向列型液晶分子长轴的方向与光的传播方向平行, 线性偏振光经过磁场中的向列液晶, 其振动面也会发生偏转, 但偏转角度相对较大。

磁场在没有改变液晶结构的情况下同样能够产生磁光效应, 这一结论与强磁场下改变液晶的结构产生磁光效应的不同, 对于液晶磁光效应的研究是有意义的。

参 考 文 献

- Zheng Jihong, Zhong Yangwan, Cai Mingrong *et al.*. Fabrication of electric a controlled polymer dispersed liquid crystal switchable focus holographic lens [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(6): 1107~1110
郑继红, 钟阳万, 蔡明荣 等. 电控聚合物分散液晶变焦全息透镜制作[J]. *光学学报*, 2007, **27**(6): 1107~1110
- Liu Yongjun, Xuan Li, Hu Lifa *et al.*. Investigation on the liquid crystal spatial light modulator with high precision and pure phase [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(12): 1682~1685
刘永军, 宣 丽, 胡立发 等. 高精度纯相位液晶空间光调制器的研究[J]. *光学学报*, 2005, **25**(12): 1682~1685
- Shu-Hsia Chen, B. J. Liang. Electro-optical effect of a magnetically biased ferromagnetic liquid crystal [J]. *Opt. Lett.*, 1988, **13**(9): 716~718
- Ren Guangjun, Yao Jianquan, Wang Peng *et al.*. Research of magneto-optical rotation of liquid crystal [J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, **56**(2): 994~998
任广军, 姚建铨, 王 鹏 等. 液晶的磁致旋光效应研究[J]. *物理学报*, 2007, **56**(2): 994~998
- Ren Guangjun, Li Guohua. Jones matrix research of polarization

- device[J]. *Chin. J. Liquid Crystal and Display*, 2003, **29**(5): 578~580
- 任广军,李国华. 液晶磁控效应的 Jones 矩阵研究[J]. *液晶与显示*, 2003, **29**(5): 578~580
- 6 Hu Xiduo, Xiang Ying, Lin Ziyang *et al.*. The initial angle solution for the ultra-short laser pulse induced transient twist reorientation in plane-aligned nematic liquid crystal [J]. *Acta Physica Sinica*, 2003, **52**(1): 192~196
- 胡西多,项 颖,林子扬 等. 平行排列丝状液晶在超短脉冲激光激励下发生瞬态扭曲形变的最佳偏振角[J]. *物理学报*, 2003, **52**(1): 192~196
- 7 Liu Hong, Wang Hui. Phase transition in biaxial nematic liquid crystal[J]. *Acta Physica Sinica*, 2005, **54**(3): 1306~1312
- 刘 红,王 慧. 双轴性向列相液晶的相变理论[J]. *物理学报*, 2005, **54**(3): 1306~1312
- 8 H. Khoshshima, H. Tajalli, A. Ghanadzadeh Gilani *et al.*. Electro-optical Kerr effect of two high birefringence nematic liquid crystals [J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2006, **39**(): 1495~1499
- 9 G. N. Ramachandran, S. Ramangesan. *Crystal Optics* [M]. in *Handbuch der Physik*, Vol. 25/1, Springer, Berlin, 1966
- 10 J. H. Judy. *Magnetic Optics Theory* [C]. in *Proceedings, Conferenc on Advances in Magnetic Recording*, N. Y. Acad of Science 189, 239, 1972
- 11 M. Freiser. *A Survey of Magneto-Optic Effects* [M]. *IEEE Trans. Magn. MAG-4*, 152, 1968