

弱锚泊对液晶微波相位调制的影响

叶文江 王梦莹 邢红玉 安亚帅 秦相磊

Influence of weak anchoring on the microwave phase modulation of liquid crystals

Ye Wen-Jiang Wang Meng-Ying Xing Hong-Yu An Ya-Shuai Qin Xiang-Lei

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 194206 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.194206

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.194206>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I19>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

细胞外钾离子浓度延迟恢复对螺旋波的影响研究

[Study on the effect of delayed recovery of extracellular potassium ion concentration on spiral wave](#)

物理学报.2014, 63(23): 238201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.238201>

气体放电系统中多臂螺旋波的数值分析

[Numerical analysis on multi-armed spiral patterns in gas discharge system](#)

物理学报.2014, 63(22): 228201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.228201>

两层耦合可激发介质中螺旋波转变为平面波

[Transformation of spiral wave to plan wave in the two layers of coupled excitable media](#)

物理学报.2014, 63(20): 208201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.208201>

钾扩散耦合引起的心脏中螺旋波的变化

[Potassium diffusive coupling-induced the variation of spiral wave in cardiac tissues](#)

物理学报.2013, 62(19): 198201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.198201>

时空调制对可激发介质螺旋波波头动力学行为影响及控制研究

[The influence of spatiotemporal modulation on spiral tip dynamics in excitable medium and its application for spiral control](#)

物理学报.2012, 61(15): 158202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.158202>

弱锚泊对液晶微波相位调制的影响*

叶文江 王梦莹 邢红玉† 安亚帅 秦相磊

(河北工业大学理学院, 天津 300401)

(2015年3月15日收到; 2015年5月15日收到修改稿)

液晶对微波的调制取决于外加电压作用下液晶分子的取向, 而基板的锚泊对液晶取向有重要影响, 必然导致微波调制的变化. 本文研究了无手性掺杂的弱锚泊 90° 扭曲向列相液晶的微波调制特性. 基于液晶弹性理论和变分原理得到了液晶盒系统的平衡态方程和边界条件, 采用差分迭代方法数值模拟了不同锚定强度大小和不同预倾角下单位长度相移随电压的变化. 结果表明: 1) 预倾角对微波相移的影响与施加电压有关. 当液晶盒施加电压为 $0.5\text{--}1.6\text{ V}$ 之间时, 随预倾角增大, 单位长度微波相移及其与强锚泊 0° 预倾角 90° 扭曲液晶相移差均增大, 且相移差达到最大时的电压值也随倾角增大而减小; $1.6\text{--}3.0\text{ V}$ 之间, 单位长度微波相移及相移差随预倾角增大而减小; 1.6 V 附近及 3.0 V 之后, 相移基本没有变化. 2) 表面锚定强度大小对微波相移的影响非常大. 随锚定强度减小, 单位长度微波相移及相移差均会增大, 微波相移的可调范围也增大, 且增加越来越明显. 此研究为液晶微波调制器件的设计提供了理论依据.

关键词: 液晶微波调制器, 单位长度相移, 弱锚泊, 锚定强度

PACS: 42.79.Hp, 78.20.Jq, 42.70.Df, 61.30.Dk

DOI: 10.7498/aps.64.194206

1 引言

液晶自从1888年被发现以来就受到了广泛研究, 20世纪中叶液晶在显示领域的应用使其快速普及, 对于液晶的研究也上升到了一个新的高度. 但是液晶的应用远不止于此, 除了在显示方面得天独厚的优势以外, 液晶还在微波调制方面有着自身的优点^[1]. 上世纪90年代Lim等^[2]发现许多液晶材料在电磁波的微波波段保持相当的双折射性, 基于此液晶可控微波相移器^[3-9]、液晶微波波长选择器^[10]和液晶微波波长波束调制器等^[11]液晶微波调制器件先后研制成功, 但是这些器件有一个共同的问题, 即液晶层的厚度较厚($75\text{--}300\text{ }\mu\text{m}$), 导致器件的响应时间较长. 为了解决这一问题, Livesey等曾对强锚泊 90° 扭曲向列相液晶的微波相移进行了研究^[12], 证明了扭曲结构能有效地增加微波的相移, 同时, 研究了弱锚泊扭曲和超扭曲向列相液

晶的微波特性^[13], 证明了随锚定能系数的减小单位长度液晶微波相移明显增加, 使得普通液晶盒作为微波调制器件成为了可能. 但是, 他们只分析了一种情况下的微波调制特性, 上下基板预倾角均为 0.57° , 预扭曲角分别为 89.38° 和 0.57° .

液晶微波调制器件的性能与液晶材料、器件的结构设计、以及器件的制作工艺均有着十分密切的联系. 虽然已经找到了合适的液晶材料, 如E7, E44, K15等等, 器件的结构设计也相对成熟, 但是器件的制作工艺还需进一步优化. 而制作工艺主要涉及基板表面的锚泊作用、预倾角和预扭曲角的选择等主要因素. 不同的取向材料和锚泊技术, 基板表面的锚定能、预倾角和预扭曲角也不同. Ye等^[14]研究了强锚泊扭曲向列相液晶的微波调制特性, 对不同的预倾角和预扭曲角的单位长度微波相移进行了数值计算, 得到了预倾角为 5° 的 90° 扭曲向列相液晶相对于强锚泊平行排列液晶在微波相移调制方面有明显的增加, 同时对弱锚泊 90° 扭曲

* 国家自然科学基金(批准号: 11374087, 11304074, 11447179)、河北省自然科学基金(批准号: A2014202123, A2015202343)、河北省教育厅项目(批准号: QN2014130)、河北省高校重点学科和大学生创新创业训练计划(批准号: 201410080001)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: hongyu_xing@163.com

向列相液晶的微波调制特性进行了简单分析, 给出了锚定能对微波相移的影响, 而预倾角的影响未进行分析. 本文对无手性掺杂的弱锚泊 90° 扭曲向列相液晶的微波相移调制特性进行了研究, 同时分析预倾角和锚定能的影响, 基板表面锚定能系数为 $1 \times 10^{-5} \text{ J/m}^2$ 预倾角为 5° 的 90° 扭曲向列液晶盒是液晶微波调制器件较好的选择, 为液晶微波调制器件的设计提供了理论依据.

2 理论分析

扭曲向列相液晶盒结构如图1所示, 液晶盒厚度为 d , 液晶分子在上下玻璃基板表面处于弱锚泊情形, 易取向方向分别为 $\mathbf{e}_d$ 和 $\mathbf{e}_0$, 预倾角分别为 θ_d 和 θ_0 , 预扭曲角分别为 φ_d 和 φ_0 . 沿 z 方向外加一电压 U 作用在液晶盒上, 当超过阈值电压时, 均匀排列的液晶分子将会产生形变, 指向矢由倾角 θ 和扭曲角 φ 确定, 而且倾角和扭曲角均只是空间坐标 z 的函数. 建立如图1所示坐标系, 则指向矢可以表示为 $\mathbf{n} = (\cos \theta \cos \varphi, \cos \theta \sin \varphi, \sin \theta)$, 上下基板处液晶分子的易取向方向分别为 $\mathbf{e}_d = (\cos \theta_d \cos \varphi_d, \cos \theta_d \sin \varphi_d, \sin \theta_d)$ 和 $\mathbf{e}_0 = (\cos \theta_0 \cos \varphi_0, \cos \theta_0 \sin \varphi_0, \sin \theta_0)$.

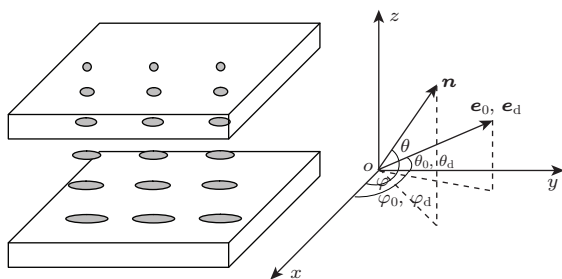


图1 扭曲向列相液晶盒结构及坐标系

Fig. 1. The configuration of twisted nematic liquid crystal cell and the coordinate system.

整个液晶盒系统的自由能包括液晶分子的弹性自由能、电场引起的自由能和上下基板表面的锚定能三部分, 单位面积液晶盒系统的自由能 F 表示为

$$\begin{aligned} F &= \int_0^d f\left(\theta(z), \varphi(z), \frac{d\theta}{dz}, \frac{d\varphi}{dz}, z\right) dz \\ &= \int_0^d \{(f_{\text{elas}} + f_{\text{EM}}) + \delta(z) f_s^- \\ &\quad + \delta(z-d) f_s^+\} dz, \end{aligned} \quad (1)$$

其中, f_{elas} 和 f_{EM} 分别为弹性自由能密度和电场引起的自由能密度, f_s^+ 和 f_s^- 分别为上下基板表面

的锚定能密度, 其表达式分别为

$$\begin{aligned} f_{\text{elas}} &= \frac{1}{2} \left[(k_{11} \cos^2 \theta + k_{33} \sin^2 \theta) \left(\frac{d\theta}{dz} \right)^2 \right. \\ &\quad + \frac{k_{33}}{4} \sin^2 2\theta \left(\frac{d\varphi}{dz} \right)^2 \\ &\quad \left. + k_{22} \left(q_0 - \cos \theta \frac{d\varphi}{dz} \right)^2 \right], \end{aligned} \quad (2)$$

$$f_{\text{EM}} = -\frac{D_z^2}{2\varepsilon_0} (\varepsilon_{\perp} \cos^2 \theta + \varepsilon_{\parallel} \sin^2 \theta)^{-1}, \quad (3)$$

$$\begin{aligned} f_s^+ &= -\frac{w}{2} (\cos \varphi \cos \theta \cos \varphi_d \cos \theta_d \\ &\quad + \sin \varphi \cos \theta \sin \varphi_d \cos \theta_d \\ &\quad + \sin \theta \sin \theta_d)^2, \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} f_s^- &= -\frac{w}{2} (\cos \varphi \cos \theta \cos \varphi_0 \cos \theta_0 \\ &\quad + \sin \varphi \cos \theta \sin \varphi_0 \cos \theta_0 \\ &\quad + \sin \theta \sin \theta_0)^2, \end{aligned} \quad (5)$$

其中, k_{11} , k_{22} 和 k_{33} 分别对应液晶材料的展曲、扭曲和弯曲弹性常数, $q_0 = 2\pi/p$, p 为手性剂的螺距, $\Delta\varepsilon$ 为液晶材料的介电各向异性, $\varepsilon_{\parallel}$ 和 $\varepsilon_{\perp}$ 分别为平行和垂直于液晶分子长轴方向的介电常数, ε_0 为真空中介电常数, w 为锚定能系数, $D_z = \varepsilon_0 U \left(\int_0^d (\varepsilon_{\perp} \cos^2 \theta + \varepsilon_{\parallel} \sin^2 \theta)^{-1} dz \right)^{-1}$ 为 z 方向的电位移矢量. 引入狄拉克函数 $\delta(z)$ 为

$$\delta(z) = \begin{cases} 0, & z \neq 0, \\ 1, & z = 0. \end{cases} \quad (6)$$

由变分原理可知当系统的自由能最小时满足欧拉方程^[15], θ 和 φ 满足的平衡态方程为

$$\begin{aligned} &\left\{ \sin \theta \cos \theta \left[(k_{11} - k_{33}) \left(\frac{d\theta}{dz} \right)^2 \right. \right. \\ &\quad + (k_{33} \cos 2\theta - 2k_{22} \cos^2 \theta) \left(\frac{d\varphi}{dz} \right)^2 \\ &\quad + \frac{4\pi k_{22}}{p} \frac{d\varphi}{dz} - \frac{\Delta\varepsilon D_z^2}{\varepsilon_0 (\varepsilon_{\parallel} \sin^2 \theta + \varepsilon_{\perp} \cos^2 \theta)^2} \left. \right] \\ &\quad \left. - (k_{11} \cos^2 \theta + k_{33} \sin^2 \theta) \frac{d^2 \theta}{dz^2} \right\} = 0, \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} &(k_{22} \cos^4 \theta + k_{33} \cos^2 \theta \sin^2 \theta) \frac{d^2 \varphi}{dz^2} \\ &\quad + 2 \sin \theta \cos \theta (k_{33} \cos 2\theta - 2k_{22} \cos^2 \theta) \frac{d\theta}{dz} \frac{d\varphi}{dz} \\ &\quad + \frac{4\pi k_{22}}{p} \sin \theta \cos \theta \frac{d\theta}{dz} = 0, \end{aligned} \quad (8)$$

下边界条件为

$$(k_{11} \cos^2 \theta_0 + k_{33} \sin^2 \theta_0) \frac{d\theta}{dz} \Big|_{z=0}$$

$$-\frac{\partial f_s^-}{\partial \theta_0} = 0, \quad (9)$$

$$-(k_{22} \cos^4 \theta_0 + k_{33} \cos^2 \theta_0 \sin^2 \theta_0) \frac{d\varphi}{dz} \Big|_{z=0} + \frac{\partial f_s^-}{\partial \varphi_0} + \frac{2\pi k_{22}}{p} \cos^2 \theta_0 = 0. \quad (10)$$

上边界条件为

$$(k_{11} \cos^2 \theta_d + k_{33} \sin^2 \theta_d) \frac{d\theta}{dz} \Big|_{z=d} + \frac{\partial f_s^+}{\partial \theta_d} = 0, \quad (11)$$

$$(k_{22} \cos^4 \theta_d + k_{33} \cos^2 \theta_d \sin^2 \theta_d) \frac{d\varphi}{dz} \Big|_{z=d} + \frac{\partial f_s^+}{\partial \varphi_d} - \frac{2\pi k_{22}}{p} \cos^2 \theta_d = 0, \quad (12)$$

其中, $\frac{\partial f_s^-}{\partial \theta_0}$, $\frac{\partial f_s^+}{\partial \theta_d}$, $\frac{\partial f_s^-}{\partial \varphi_0}$ 和 $\frac{\partial f_s^+}{\partial \varphi_d}$ 与文献[13]中给出的一致.

由于考虑弱锚定情况, 当外加一电压时, 扭曲向列相液晶盒上下基板的倾角和扭曲角不再是固定不变的, 边界指向矢的分布由方程(9)–(12)式决定, 中间层液晶指向矢分布由方程(7)和(8)式决定. 一旦液晶指向矢分布确定, 微波传输通过液晶层单位长度相移可表示为

$$\Phi(V) = \frac{360f}{c} (\sqrt{\varepsilon'_{\text{eff}}} - \sqrt{\varepsilon'_{\perp}}), \quad (13)$$

$$\frac{1}{\varepsilon'_{\text{eff}}} = \frac{\cos^2 \theta}{\varepsilon'_{\perp}} + \frac{\sin^2 \theta}{\varepsilon'_{//}}, \quad (14)$$

其中, f 为微波的频率, c 为光速, $\varepsilon'_{\text{eff}}$ 为微波有效介电常数, $\varepsilon'_{\perp}$ 和 $\varepsilon'_{//}$ 分别为平行和垂直于液晶分子长轴方向的微波介电常数. 液晶指向矢倾角在 z 方向变化, 微波有效介电常数也随之变化. 为了计算方便, 同样采取文献[12]中的方法, 用倾角的平均值代替(14)式中的倾角, 则可以由(13)和(14)式得到液晶微波传输的单位长度相移. 液晶指向矢倾角平均值的表达式为

$$\theta_{\text{average}} = \frac{1}{d} \int_0^d \theta(z) dz. \quad (15)$$

3 数值模拟

采用文献[16, 17]中的差分迭代法进行数值模拟计算, 将液晶层沿 z 轴分成 $N(101)$ 层, 每一液晶分子层的厚度为 $h = d/N$, 上下基板处分别为第 N 层和第 1 层, 向列相液晶材料为 E7, 参数如表 1 所示[18], 液晶盒的厚度为 $d = 10 \mu\text{m}$, 微波频率 $f = 60 \text{ GHz}$.

表 1 向列相液晶 E7 材料参数

Table 1. Material parameters of nematic liquid crystal E7.

Parameter	k_{11}/pN	k_{22}/pN	k_{33}/pN	$\varepsilon_{//}$	$\varepsilon_{\perp}$	$\varepsilon'_{//}$	$\varepsilon'_{\perp}$
E7	11.1	10.0	17.1	19.0	5.2	3.24	2.78

计算中, 上下基板表面摩擦产生的预扭曲角分别为 90° 和 0° , 为了分析预倾角和锚定强度系数对液晶微波相移的影响, 首先给出了预倾角取 0° , 1° , 2° , 3° , 4° , 5° 锚定能系数取不同值时单位长度液晶微波相移及相移差(与强锚泊 0° 预倾角 90° 扭曲液晶微波相移相比)随电压的变化, 电压的取值范围是 $0-4 \text{ V}$, 如图 2 至图 7 所示; 然后, 给出了锚定能系数为 10^{-5} J/m^2 预倾角取不同值时单位长度液晶微波相移及相移差随电压的变化, 如图 8 所示.

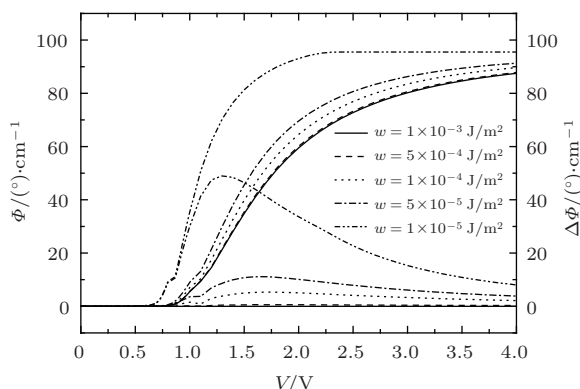


图 2 不同锚定能系数, 0° 预倾角 90° 扭曲液晶盒单位长度微波相移及相移差随电压的变化

Fig. 2. Variation of microwave phase-shift per unit-length and phase-shift difference of 90° -twisted cell with voltage for different anchoring energy coefficient when the pre-tilt angles of two substrates are 0° .

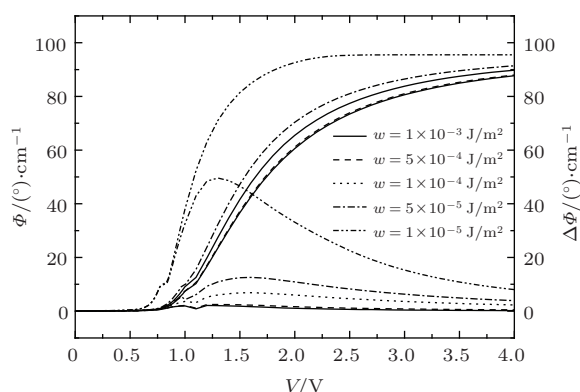


图 3 不同锚定能系数, 1° 预倾角 90° 扭曲液晶盒单位长度微波相移及相移差随电压的变化

Fig. 3. Variation of microwave phase-shift per unit-length and phase-shift difference of 90° -twisted cell with voltage for different anchoring energy coefficient when the pre-tilt angles of two substrates are 1° .

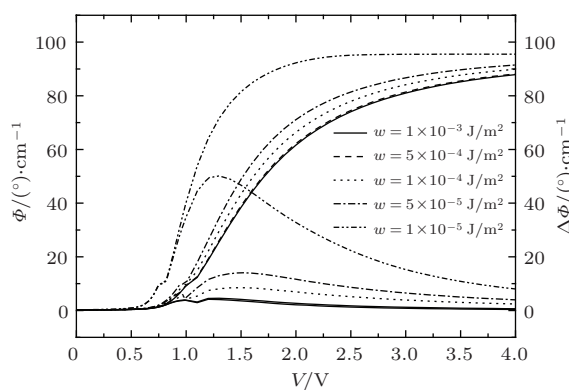


图4 不同锚定能系数, 2° 预倾角 90° 扭曲液晶盒单位长度微波相移及相移差随电压的变化

Fig. 4. Variation of microwave phase-shift per unit-length and phase-shift difference of 90°-twisted cell with voltage for different anchoring energy coefficient when the pre-tilt angles of two substrates are 2°.

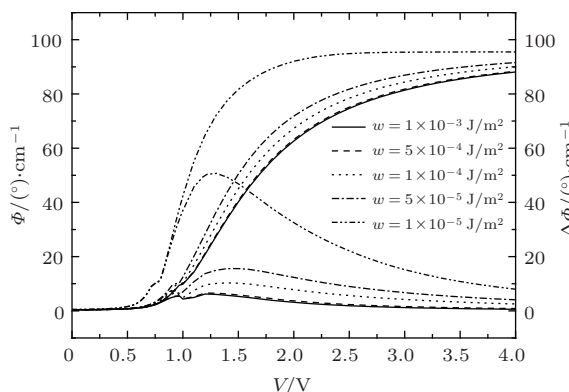


图5 不同锚定能系数, 3° 预倾角 90° 扭曲液晶盒单位长度微波相移及相移差随电压的变化

Fig. 5. Variation of microwave phase-shift per unit-length and phase-shift difference of 90°-twisted cell with voltage for different anchoring energy coefficient when the pre-tilt angles of two substrates are 3°.

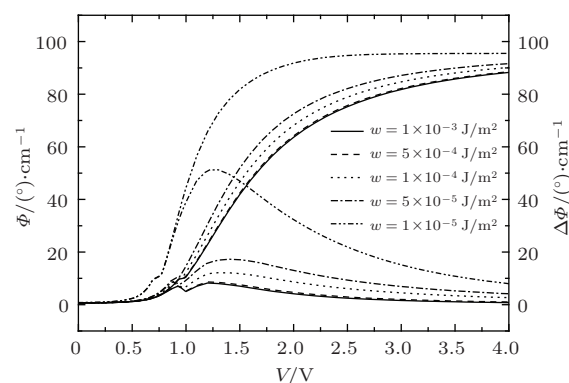


图6 不同锚定能系数, 4° 预倾角 90° 扭曲液晶盒单位长度微波相移及相移差随电压的变化

Fig. 6. Variation of microwave phase-shift per unit-length and phase-shift difference of 90°-twisted cell with voltage for different anchoring energy coefficient when the pre-tilt angles of two substrates are 4°.

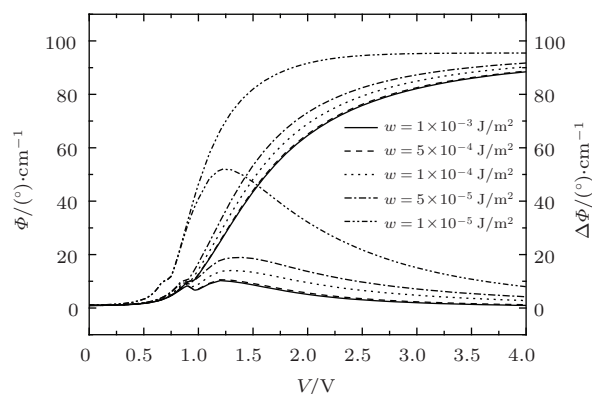


图7 不同锚定能系数, 5° 预倾角 90° 扭曲液晶盒单位长度微波相移及相移差随电压的变化

Fig. 7. Variation of microwave phase-shift per unit-length and phase-shift difference of 90°-twisted cell with voltage for different anchoring energy coefficient when the pre-tilt angles of two substrates are 5°.

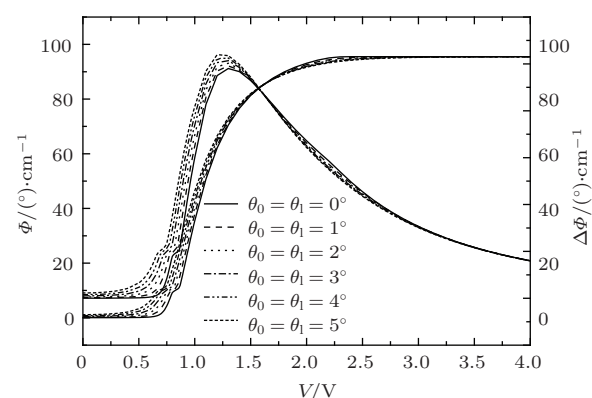


图8 不同预倾角, 锚定能系数为 10^{-5} J/m² 的 90° 扭曲液晶盒单位长度微波相移及相移差随电压的变化

Fig. 8. Variation of microwave phase-shift per unit-length and phase-shift difference of 90°-twisted cell with voltage for different pre-tilt angles when the anchoring energy coefficient of two substrates are 10^{-5} J/m².

无论基板表面锚泊预倾角取多大, 随锚定能系数的减小, 单位长度微波相移及相移差均会增大, 微波相移的可调范围也增大, 且增加越来越明显, 如图2至图7所示. 锚定能系数较大时 ($\geq 5 \times 10^{-4}$ J/m²), 相对于强锚泊 0° 预倾角 90° 扭曲液晶单位长度微波相移基本没有变化; 锚定能系数为 1×10^{-5} J/m² 时液晶单位长度微波相移差最大, 并且最大相移对应的电压最小. 如图8所示, 预倾角对单位长度微波相移的影响与施加电压有关. 当液晶盒施加电压为 0.5—1.6 V 之间时, 随预倾角增大, 单位长度微波相移及相移差均增大, 相移差达到最大时的电压值也随倾角增大而减小; 1.6—3.0 V 之间, 单位长度微波相移及相移差预倾

角增大而减小; 1.6 V 附近及 3.0 V 之后, 相移基本没有变化.

不同的锚定强度和预倾角对 90° 扭曲向列相液晶微波相移有如此大的区别, 本质上是由于外加一定电压下随锚定能系数的减小和预倾角的增大基板表面的倾角在增大, 导致平均的指向矢倾角也在增大, 电压为 1.2 V 时预倾角为 5° 不同锚定能系数的 90° 扭曲液晶盒指向矢倾角分布如图 9 所示. 当基板表面锚定能系数为 $1 \times 10^{-5} \text{ J/m}^2$ 时, 基板表面的倾角明显增大, 而相对较强的锚定能, 指向矢倾角基本没有变化.

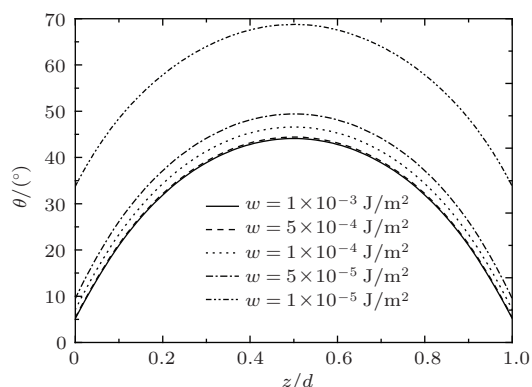


图9 电压为 1.2 V 时, 预倾角为 5° , 不同锚定能系数的 90° 扭曲液晶盒指向矢倾角分布

Fig. 9. Distribution of liquid crystal director of 90° -twisted cell with pre-tilt angle 5° and different anchoring energy coefficients when the applied voltage is 1.2 V.

4 结 论

本文采用液晶弹性理论和差分迭代方法研究了基板表面锚定强度以及预倾角对无手性掺杂的弱锚泊 90° 扭曲向列相液晶的微波调制特性的影响. 与强锚定 90° 扭曲向列相液晶不同, 在弱锚定条件下, 外加电压使得基板表面的液晶分子取向也发生变化, 且锚定强度对基板表面的液晶分子取向的影响很明显, 则其对微波相移的影响也是显而易见的. 而预倾角对微波相移的影响与外加电压相关, 不同的电压取值范围, 随预倾角增大 ($\leq 5^\circ$), 微

波相移增大或减小. 因此, 为了得到微波相移的最佳调制效果, 基板表面锚定能系数为 $1 \times 10^{-5} \text{ J/m}^2$ 预倾角为 5° 的 90° 扭曲向列相液晶盒是较好的选择, 并且工作电压选择为 1.2 V 左右, 为液晶微波调制器的设计提供重要的理论参考.

参考文献

- [1] Yang F Z 2008 *Progress in Physics* **28** 107 (in Chinese) [杨傅子 2008 物理学进展 **28** 107]
- [2] Lim K C, Margerum J D, Lackner A M, Sherman E, Smith W H 1993 *Liq. Cryst.* **14** 327
- [3] Nguyen T, Umeno S, Higuchi H, Kikuchi H, Moritake H 2014 *Jpn. J. Appl. Phys.* **53** 01AE08
- [4] Fujikake H, Kuki T, Nomoto T, Tsuchiya Y, Utsumi Y 2001 *J. Appl. Phys.* **89** 5295
- [5] Lim K C, Margerum J D, Lackner A M 1993 *Appl. Phys. Lett.* **62** 1065
- [6] Tanaka M, Nose T, Sato S 2000 *Jpn. J. Appl. Phys.* **39** 6393
- [7] Dolfi D, Labeyrie M, Joffre P, Huignard J P 1993 *Electron. Lett.* **29** 926
- [8] Müller S, Scheele P, Weil C, Wittek M, Hock C, Jakoby R 2004 *IEEE MTT-S Digest* 1153
- [9] Garbovskiy Yu, Zagorodnii V, Krivosik P, Lovejoy J, Camley R E, Celinski Z, Glushchenko A, Dziaduszek J, Dbrowski R 2012 *J. Appl. Phys.* **111** 054504
- [10] Yang F Z, Sambles J R 2001 *Appl. Phys. Lett.* **79** 3717
- [11] Yang F Z, Sambles J R 2004 *Appl. Phys. Lett.* **85** 2041
- [12] Karwin C M, Livesey K L 2013 *Appl. Phys. Lett.* **103** 063508
- [13] Karwin C K, Livesey K L 2014 *Liq. Cryst.* **41** 707
- [14] Ye W J, Xing H Y, Zhou X, Sun Y B, Zhang Z Z 2015 *AIP Adv.* **5** 067145
- [15] Yang D K, Wu S T 2006 *Fundamentals of Liquid Crystal Devices* (Chichester: John Wiley & Sons Ltd) pp127–130
- [16] Wang Q, He S L 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 926 (in Chinese) [王谦, 何赛灵 2001 物理学报 **50** 926]
- [17] Zhang Z Z, Ye W J, Xing H Y 2004 *Chinese J. Comput. Phys.* **21** 156 (in Chinese) [张志东, 叶文江, 邢红玉 2004 计算物理 **21** 156]
- [18] Bulja S, Mirshekar-Syahkal D, James R, Day S E, Fernández F A 2010 *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* **58** 3493

Influence of weak anchoring on the microwave phase modulation of liquid crystals*

Ye Wen-Jiang Wang Meng-Ying Xing Hong-Yu[†] An Ya-Shuai Qin Xiang-Lei

(School of Sciences, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China)

(Received 15 March 2015; revised manuscript received 15 May 2015)

Abstract

The microwave modulation induced by liquid crystals is determined by the orientation of liquid crystal molecules under an external applied voltage. The anchoring of substrate has an important effect on the liquid crystal orientation, which results in the change of microwave modulation. In this paper, the microwave modulation property of 90° twisted nematic liquid crystals with weak anchoring without chiral dopant is studied. Based on the elastic theory of liquid crystals and the variational theory, the equations of equilibrium state and the boundary condition are given, and the variations of phase-shift per unit-length with voltage for different anchoring energy coefficients and pre-tilt angles are also simulated using the finite-difference iterative method. Results are as follows: (1) The influence of pre-tilt angle on microwave phase-shift is related to the applied voltage. When the voltage applied to the liquid crystal cell is from 0.5 to 1.6 V, with increasing pre-tilt angle, the microwave phase-shift per unit-length and the phase-shift difference relative to the strong anchoring 90° twisted nematic liquid crystal with pre-tilt angle 0° will all increase, and the applied voltage for the maximum phase-shift difference decreases. When the applied voltages are from 1.6 to 3.0 V, the microwave phase-shift per unit-length and the phase-shift difference all decrease with increasing pre-tilt angle. When the applied voltages are near 1.6 V or larger than 3.0 V, the phase-shift per unit-length has little change. (2) The anchoring energy strength has a great influence on microwave phase-shift. As the anchoring strength decreases, the microwave phase shift per unit-length and the phase-shift difference will increase, also the tunable range of microwave phase-shift increases more and more obviously. This research provides a theoretical foundation for the design of the liquid crystal modulator.

Keywords: liquid crystal microwave modulator, phase-shift per unit-length, weak anchoring, anchoring strength

PACS: 42.79.Hp, 78.20.Jq, 42.70.Df, 61.30.Dk

DOI: 10.7498/aps.64.194206

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11374087, 11304074, 11447179), the Natural Science Foundation of Hebei Province, China (Grant Nos. A2014202123, A2015202343), the Research Project of Hebei Education Department, China (Grant No. QN2014130), the Key Subject Construction Project of Hebei Provincial University, and the Undergraduate Innovation and Entrepreneurship Training Program, China (Grant No. 201410080001).

[†] Corresponding author. E-mail: hongyu_xing@163.com