

文章编号:1007-2780(2018)06-0483-07

基板表面锚泊对液晶全漏导模影响的理论研究

孙婷婷,袁 瑞,李振杰,朱吉亮,邢红玉,叶文江*

(河北工业大学 理学院,天津 300401)

摘要:平行排列向列相液晶盒基板表面锚泊能可以影响液晶盒内液晶分子指向矢的分布,光学上将导致液晶导模结构的变化。为了研究基板表面锚泊对液晶全漏导模的影响,首先基于液晶弹性理论推导了液晶指向矢在外加电压下满足的平衡态方程,随后由差分迭代方法数值计算液晶指向矢。最后,基于液晶多层光学理论推导了液晶导波反射率和透射率公式,并通过数值计算得到了平行排列向列相液晶全漏波导反射率 R_{ss} 随内角变化的理论曲线。计算结果表明,相对于强锚泊情形($1 \times 10^{-3} \text{ J/m}^2$),不同锚泊能强度($5 \times 10^{-5} \text{ J/m}^2 \sim 1 \times 10^{-3} \text{ J/m}^2$)下的理论曲线会发生左移现象,移动距离与锚泊能强度有关。由曲线移动的距离可以确定液晶盒基板表面锚泊能的强度。该研究为进一步利用光导波技术测量液晶盒基板表面锚泊能强度提供了理论依据。

关键词:锚泊;全漏导模;平行排列向列相;液晶弹性理论;多层光学理论

中图分类号:O753.2 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/YJYXS20183306.0483

Theoretical study of the surface anchoring effect on the full leaky waveguide mode of liquid crystal

SUN Ting-ting, YUAN Rui, LI Zhen-jie, ZHU Ji-liang,

XING Hong-yu, YE Wen-jiang*

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

Abstract: Surface anchoring energy of the substrates can affect the distribution of liquid crystal director in parallel-aligned nematic liquid crystal cell, and the structure of liquid crystal guide mode will be changed in the optics. To investigate the influence of the anchoring energy on the liquid crystal fully leaky guided mode, the equilibrium equation of the liquid crystal director was deduced under the external applied voltage based on the elastic theory of liquid crystal, and then the liquid crystal director was numerically calculated by the differential iteration method. Finally, the formula on reflectivity and transmittance of liquid crystal waveguide was obtained based on the multilayer optics theory of

收稿日期:2018-01-23; **修订日期:**2018-03-19.

基金项目:国家自然科学基金(No.11374087, No.11504080);河北省自然科学基金(No. A2014202123, No. A2017202004)、河北省教育厅项目(No.QN2014130)和河北省高校重点学科资助课题

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 11374087, No.11504080); Natural Science Foundation of Hebei Province (No. A2014202123, No. A2017202004); Research Project of Hebei Education Department (No. QN2014130); Key Subject Construction Project of Hebei Province University

* 通信联系人, E-mail: wenjiang_ye@hebut.edu.cn

liquid crystal. The theoretical curves of R_{ss} versus internal degree were calculated in this paper. The results show that the theoretical curves of different anchoring energy strength ($5 \times 10^{-5} \text{ J/m}^2 \sim 1 \times 10^{-3} \text{ J/m}^2$) will be shifted to the left compared with the strong anchoring ($1 \times 10^{-3} \text{ J/m}^2$) condition, and the moving distance is related to the anchoring energy strength. The anchoring energy strength of substrate surface can be determined by the moving distance of the curves. This study provides a theoretical basis for further measuring the anchoring energy of the substrates in a liquid crystal cell by using optical guided wave technique.

Key words: anchoring; fully leaky guided mode; planer aligned nematic; elastic theory of liquid crystal; multilayer optics theory

1 引言

20 世纪 70 年代开始,液晶材料被广泛应用于显示器件当中。除了液晶材料自身外,基板表面对液晶分子的锚泊作用不仅影响盒内液晶分子指向矢分布的均匀性,还对液晶盒的视角特性、电光特性及动态响应产生一定的影响,进而影响液晶显示器件的品质^[1]。一些非显示液晶器件,如铁电液晶器件^[2]、聚合物分散液晶光栅^[3]、液晶微波调制器^[4-5]、液晶光阀^[6]等同样需要弱锚泊处理。因此,研究怎样更好地实现锚泊处理,以及如何准确地测量基板锚泊能强度一直都是液晶领域重要的研究内容。基板表面的锚泊处理可以分为两大类,接触型和非接触型。接触类型主要有摩擦取向技术,定向的摩擦覆盖在玻璃基板表面的取向层来实现液晶分子的定向排列,其工艺简单、操作方便、成本低,主要用于工业上的批量生产;非接触型主要包括倾斜蒸镀法和光控取向技术,其取向的稳定性和均匀性比较好,主要用于实验室的研究。

基板表面锚泊能的测量通常采用电学和光学的方法。Nie X Y^[7]等人曾提出一种利用电场方法测量垂直排列向列相(VA)液晶盒基板表面的锚泊能。通过测量不同电压下穿过 VA 盒光束的相位延迟 R,再根据 R 与基板锚泊能之间的关系得到了基板锚泊能的具体数值。Ye W J 和 Hao H M^[8]等人采用交流电桥的方法设计了基板表面锚泊能的测量。通过比较实验测得的 C-U 曲线与基于液晶弹性理论得到的 C-U 理论曲线,根据液晶盒电容与基板表面锚泊能的关系可以得到锚泊能的具体数值。除了电学的方法,Beak S I^[9]等人利用偏光显微镜在反射模式下观察基板与液晶层的交界处液晶分子指向矢变化,得到电

相干长度与反射率的关系曲线,而电相干长度与基板锚泊能存在关系,进而得到锚泊能的具体数值。但不管哪种方法,确定基板表面锚泊能对液晶指向矢的影响是重要前提,光导波技术可以精确描绘出液晶指向矢剖面的细微变化。

光导波技术是一种通过研究限制在光波导内部或其表面附近的光波,由导模结构的变化反映波导层光学信息的光学技术^[10]。限制在液晶盒上下玻璃基板之间的液晶层可以视为波导层,基板表面的锚泊能会直接影响液晶指向矢分布进而影响导模结构的变化^[11]。不同锚泊能情况下,光束通过液晶盒后导模结构反映的光学信息不同,由此分析其变化得到基板的锚泊能。本文从理论上研究基板表面锚泊对液晶全漏导模的影响,利用液晶弹性理论^[12]和液晶多层光学理论^[13],通过分析光穿过基板表面不同锚泊能的平行排列向列相(PAN)液晶盒的光学信息,总结了锚泊能对全漏导模影响的规律,为进一步利用光导波技术测量液晶盒基板表面锚泊能强度提供了理论依据。

2 理论基础

2.1 液晶弹性理论

厚度为 l 的弱锚泊 PAN 盒的结构和液晶指向矢 $\mathbf{n}$ 在笛卡尔坐标系中的表示如图 1 所示, z 轴垂直于基板平面,并且上下基板分别位于 $z=l$ 和 $z=0$ 平面。在不施加电压情况下,如图 1(a),正性液晶分子平行于上下基板平面分布;当液晶盒上下基板施加一定的电压 U 时,如图 1(b),正性液晶分子排列将沿电场的方向变化。由于基板弱锚泊作用,基板表面处液晶分子将偏离平行排列,偏转一定的角度,其大小与锚泊能强度大小相关。液晶指向矢变化局限在 xoz 平面内,可表示

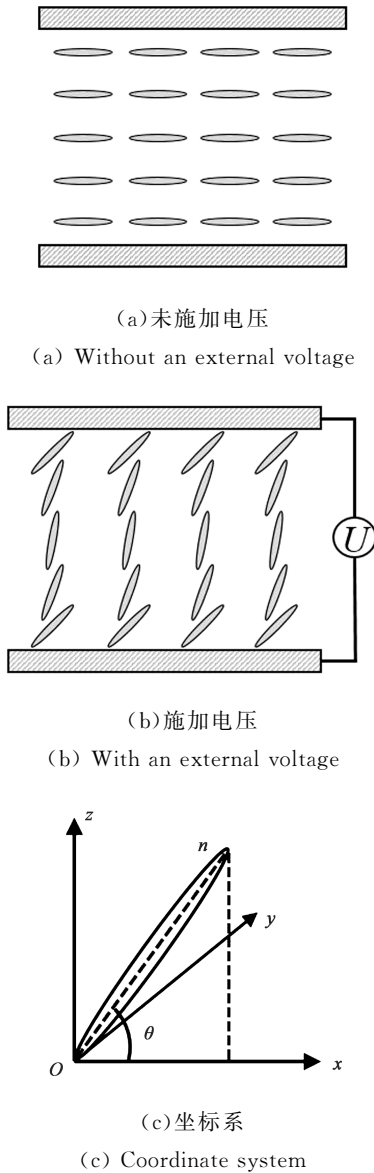


图1 平行排列向列液晶盒结构及坐标系

Fig.1 Parallel aligned nematic liquid crystal cell structure and the coordinate system

为 $\mathbf{n} = (\cos\theta, 0, \sin\theta)$, 倾角 θ 仅依赖于坐标 z 。

不考虑液晶的极化, PAN 液晶盒系统的自由能包括体弹性自由能、介电自由能和基板表面的锚泊能 3 部分, 表示为:

$$F = \int_0^l (f_{\text{elas}} + f_{\text{diel}}) dz + F_d + F_u, \quad (1)$$

$$f_{\text{elas}} = \frac{1}{2} f(\theta) \left(\frac{d\theta}{dz} \right)^2, \quad (2)$$

$$f_{\text{diel}} = -\frac{1}{2} g(\theta) E_z^2, \quad (3)$$

其中: $f(\theta) = k_{11} \cos^2\theta + k_{33} \sin^2\theta$, $g(\theta) =$

$\epsilon_0 (\epsilon_{\perp} + \Delta\epsilon \sin^2\theta)$, k_{11} 和 k_{33} 分别是液晶的展曲和弯曲弹性常数, ϵ_0 为真空介电常数, $\Delta\epsilon = \epsilon_{//} - \epsilon_{\perp}$ 为液晶的介电各向异性, $\epsilon_{//}$ 和 $\epsilon_{\perp}$ 分别为液晶的平行和垂直介电常数, F_d 和 F_u 分别是下基板和上基板单位面积锚泊能, 其形式为:

$$F_d = \frac{1}{2} A_1 \sin^2(\theta_0 - \Theta_1), \quad (4)$$

$$F_u = \frac{1}{2} A_2 \sin^2(\theta_l - \Theta_2), \quad (5)$$

其中: A_1 和 A_2 分别表示下基板和上基板的锚泊能强度, θ_0 和 θ_l 表示下基板和上基板处液晶指向矢倾角, Θ_1 和 Θ_2 分别是下基板和上基板锚泊易取向方向。考虑上下基板锚泊处理相同, 则上下基板表面的锚泊能强度和锚泊易取向方向相等, 即 $A_2 = A_1 = A$ 并且 $\Theta_2 = \Theta_1 = \Theta$ 。

系统达到平衡时, 将总的自由能代入到欧拉方程得到 θ 满足的微分方程和边界条件为

$$\frac{1}{2} \frac{df(\theta)}{d\theta} \left(\frac{d\theta}{dz} \right)^2 - \frac{d}{dz} \left[f(\theta) \frac{d\theta}{dz} \right] - \frac{1}{2} \Delta\epsilon D_z^2 \frac{\sin 2\theta}{g^2(\theta)} = 0, \quad (6)$$

$$f(\theta_l) \frac{d\theta}{dz} \Big|_{z=l} + \frac{1}{2} A \sin 2(\theta_l - \Theta) = 0, \quad (7)$$

$$f(\theta_0) \frac{d\theta}{dz} \Big|_{z=0} + \frac{1}{2} A \sin 2(\theta_0 - \Theta) = 0, \quad (8)$$

其中: D_z 为 z 方向电位移矢量, 且 $D_z = U \Big/ \int_0^l \frac{dz}{g(\theta)}$ 。

2.2 液晶多层光学理论

液晶层可视为多层光学各向异性介质薄膜, 光在其中传播的问题可通过 Berreman 4×4 矩阵方法^[14]解决。由于光在液晶盒中是沿 z 轴传播, 根据麦克斯韦方程组, 光波场的变化需用 E_x 、 E_y 、 H_x 和 H_y 四个分量描述。将整个液晶层分为 N 层, 每一液晶子层对应一个 Berreman 矢量 $\Psi = (E_x, \eta_0 H_y, E_y, -\eta_0 H_x)^T$, 并且满足 Berreman 方程

$$\frac{\partial \Psi}{\partial z} = -ik_0 \mathbf{Q} \cdot \Psi, \quad (9)$$

其中: $\eta_0 = \sqrt{\mu_0 / \epsilon_0}$ 为本质阻抗, μ_0 为真空磁化率, $k_0 = 2\pi / \lambda$, λ 为光波的波长, Berreman 4×4 矩阵 $\mathbf{Q}$ 与液晶介电常数张量相关, 不同液晶子层之间通过传输矩阵 $\mathbf{P}$ 连接, $\mathbf{P}$ 矩阵同样为 4×4 矩阵。由方程(10)可以确定第 $j+1$ 层和第 j 层的 Berreman 矢量 Ψ_{j+1} 与 Ψ_j 满足下面的关系

$$\Psi_{j+1} = e^{-ik_0 h Q_j} \cdot \Psi_j = \mathbf{P}_j \cdot \Psi_j, \quad (10)$$

$h=l/N$ 为液晶子层的厚度。整个液晶层的传输矩阵为 $\mathbf{P} = \prod_{j=1}^N \mathbf{P}_j$, 将其作用在液晶层上下表面处三条光线入射光、反射光及透射光的 Berreman 矢量 $\boldsymbol{\psi}_i$ 、 $\boldsymbol{\psi}_r$ 和 $\boldsymbol{\psi}_t$ 上, 根据光波场在液晶层上下边界处切向分量的连续性, 可以得到如下关系

$$\mathbf{P}(\boldsymbol{\psi}_i + \boldsymbol{\psi}_r) = \boldsymbol{\psi}_t, \quad (11)$$

假设液晶盒上下玻璃基板的折射率均为 n , 光以 γ 角 (与 z 轴之间的夹角) 入射到液晶层, 则 $\boldsymbol{\psi}_i$ 、 $\boldsymbol{\psi}_r$ 和 $\boldsymbol{\psi}_t$ 三个 Berreman 矢量可以表示为

$$\begin{cases} \boldsymbol{\psi}_i = (E_{ip} \cos \gamma, nE_{ip}, E_{is}, nE_{is} \cos \gamma)^T \\ \boldsymbol{\psi}_r = (-E_{rp} \cos \gamma, nE_{rp}, E_{rs}, -nE_{rs} \cos \gamma)^T \\ \boldsymbol{\psi}_t = (E_{tp} \cos \gamma, nE_{tp}, E_{ts}, nE_{ts} \cos \gamma)^T \end{cases} \quad (12)$$

其中: E_{ip} 、 E_{rp} 和 E_{tp} 分别为 p 光的入射振幅、反射振幅和透射振幅, E_{is} 、 E_{rs} 和 E_{ts} 分别为 s 光的入射振幅、反射振幅和透射振幅, n 为液晶层上下介质的折射率。根据 (11) 和 (12), 得到 p 光和 s 光通过液晶层的偏振保存和偏振转换反射率和透射率为

$$\begin{cases} R_{pp} = (G_{11} + G_{12}) \cdot (G_{11} + G_{12})^* \\ R_{ps} = (G_{21} + G_{22}) \cdot (G_{21} + G_{22})^* \\ R_{sp} = (G_{13} + G_{14}) \cdot (G_{13} + G_{14})^* \\ R_{ss} = (G_{23} + G_{24}) \cdot (G_{23} + G_{24})^* \end{cases}, \quad (13)$$

$$\begin{cases} T_{pp} = (G_{31} + G_{32}) \cdot (G_{31} + G_{32})^* \\ T_{ps} = (G_{41} + G_{42}) \cdot (G_{41} + G_{42})^* \\ T_{sp} = (G_{33} + G_{34}) \cdot (G_{33} + G_{34})^* \\ T_{ss} = (G_{43} + G_{44}) \cdot (G_{43} + G_{44})^* \end{cases}, \quad (14)$$

其中矩阵 $\mathbf{G}$ 满足公式 (15)

$$\mathbf{G} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & F_{11} + F_{12} \frac{n}{\cos \gamma} & \frac{F_{13}}{\cos \gamma} + F_{14} n \\ -1 & 0 & F_{21} \frac{\cos \gamma}{n} + F_{22} & \frac{F_{23}}{n} + F_{24} \cos \gamma \\ 0 & -1 & F_{31} \cos \gamma + F_{32} n & F_{33} + F_{34} n \cos \gamma \\ 0 & 1 & \frac{F_{41}}{n} + \frac{F_{42}}{\cos \gamma} & \frac{F_{43}}{n \cos \gamma} + F_{44} \end{pmatrix}^{-1}, \quad (15)$$

其中 $\mathbf{F} = \mathbf{P}^{-1}$ 为整个液晶层传输矩阵的逆矩阵。

实验中, 为了光穿过整个液晶层的反射率和透射率的变化, 需要采用棱镜耦合技术使入射光穿过棱镜耦合射入液晶层, 再通过棱镜耦合射出 (反射或透射) 液晶层。改进的全漏液晶波导几何结构如图 2 所示, 主要由上下低折射率棱镜和液晶盒构成, 中间使用折射率匹配液连接。液晶盒上下基板、匹配液及棱镜的折射率都相同, 可以保证光在不同介质中传播时不会发生偏折现象。这样, 光线经空气到达耦合棱镜的入射角 γ' (外角) 与进入棱镜的耦合光到达液晶层的角度 γ (内角) 之间的关系可由 Snell 公式确定。

$$\gamma = \sigma - \arcsin\left(\frac{n_0 \sin \gamma'}{n_p}\right), \quad (16)$$

其中: σ 是棱镜的底角, n_0 为空气折射率, n_p 为棱镜的折射率。液晶层上下表面反射和透射偏振保存和偏振转换信号经过耦合棱镜射入空气

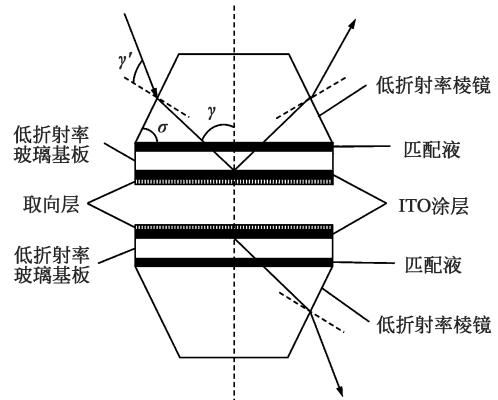


图 2 改进的全漏液晶波导几何结构

Fig. 2 Geometry of improved fully leaky liquid crystal waveguide

中, 即为实验测量的反射光和透射光信号, 由 Fresnel 公式可以得到 p 光和 s 光穿过全漏液晶波导的偏振保存和偏振转换反射率和透射率公式:

$$\begin{cases} R'_{pp} = L_p M_p R_{pp} \\ R'_{ps} = L_p M_s R_{ps} \\ R'_{sp} = L_s M_p R_{sp} \\ R'_{ss} = L_s M_s R_{ss} \end{cases}, \quad (17)$$

$$\begin{cases} T'_{pp} = L_p N_p T_{pp} \\ T'_{ps} = L_p N_s T_{ps} \\ T'_{sp} = L_s N_p T_{sp} \\ T'_{ss} = L_s N_s T_{ss} \end{cases}, \quad (18)$$

其中: L_p 、 L_s 、 M_p 、 M_s 、 N_p 、 N_s 为 p 光或 s 光由空气射入耦合棱镜或由耦合棱镜射出至空气中对应的转换系数。

3 结果与分析

通过差分迭代方法^[14]可以确定某一外加电

压下液晶指向矢倾角 θ 的分布。液晶层沿 z 轴分成 N 层,第 1 层和第 N 层分别表示下基板和上基板处表面层,将指向矢倾角 θ 差分形式分别代入 PAN 盒体平衡态方程和边界条件得到液晶分子指向矢倾角的迭代方程,再通过计算机编程计算得到一定电压下液晶指向矢的分布,不同锚泊能强度情况下 ($5 \times 10^{-5} \sim 1 \times 10^{-3} \text{ J/m}^2$) 液晶指向矢分布如图 3 所示。计算中,PAN 盒的结构参数和液晶材料参数如下:盒厚 $l = 8 \text{ } \mu\text{m}$;易取方向 $\Theta = 0$;ITO 的介电常数为 $3.3 \pm i0.12$,厚度为 50 nm ;PI 的介电常数为 $3.1 \pm i0.001$,厚度为 50 nm ;液晶材料为 E7,参数如表 1 所示。

图 3 显示基板表面锚泊能强度对 PAN 盒中液晶指向矢分布有明显的影响,必然导致液晶导模的变化,即光穿过液晶层的偏振转换和偏振保

表 1 E7 液晶材料参数

Tab.1 Material parameters of nematic liquid crystal E7

Parameter	k_{11}/pN	k_{22}/pN	k_{33}/pN	$\epsilon_{//}$	$\epsilon_{\perp}$	n_e	n_o
E7	11.1	10.0	17.1	19.184	5.103	1.720	1.521

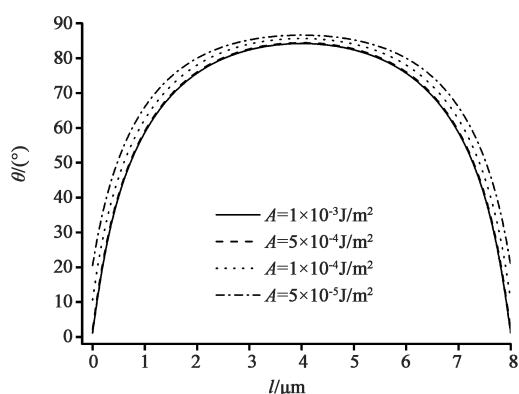


图 3 不同锚泊能强度的 PAN 盒中施加 3 V 电压时液晶指向矢分布

Fig.3 Distribution of director of liquid crystal when 3 V voltage is applied in PAN cell with different anchoring energy strength

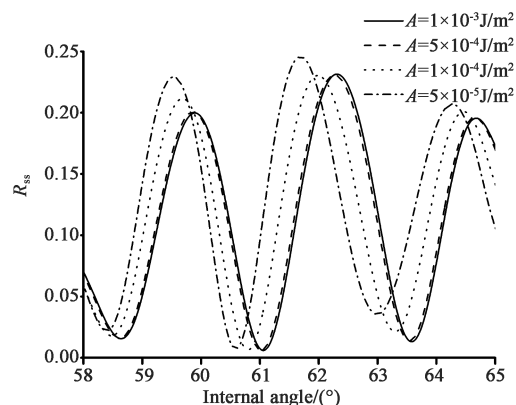


图 4 不同锚泊能强度下液晶全漏导模反射率 R_{ss} 随内角的变化

Fig.4 Variation of the reflectivity R_{ss} of the fully leaky guided mode in liquid crystal with different anchoring energy strength

存反射率和透射率随内角变化而改变。由液晶多层光学理论数值模拟可知, R_{ss} 对锚泊能变化的影响比较敏感。外加 3 V 电压,不同锚泊能强度下 ($5 \times 10^{-5} \text{ J/m}^2 \sim 1 \times 10^{-3} \text{ J/m}^2$) R_{ss} 随内角的变化如图 4 所示,耦合棱镜和折射率匹配液的折射率与液晶盒玻璃基板的折射率一样,均为 1.52,光

波波长为 $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ 。

由图 4 可知,随基板表面锚泊能强度由强 ($1 \times 10^{-3} \text{ J/m}^2$) 到弱 ($5 \times 10^{-5} \text{ J/m}^2$) 变化, R_{ss} 随内角变化曲线呈现左移趋势,并且锚泊能强度差值不同,曲线移动的距离也不同,也就是说移动的距离与锚泊能强度有关,因此可以根据 R_{ss} 移动

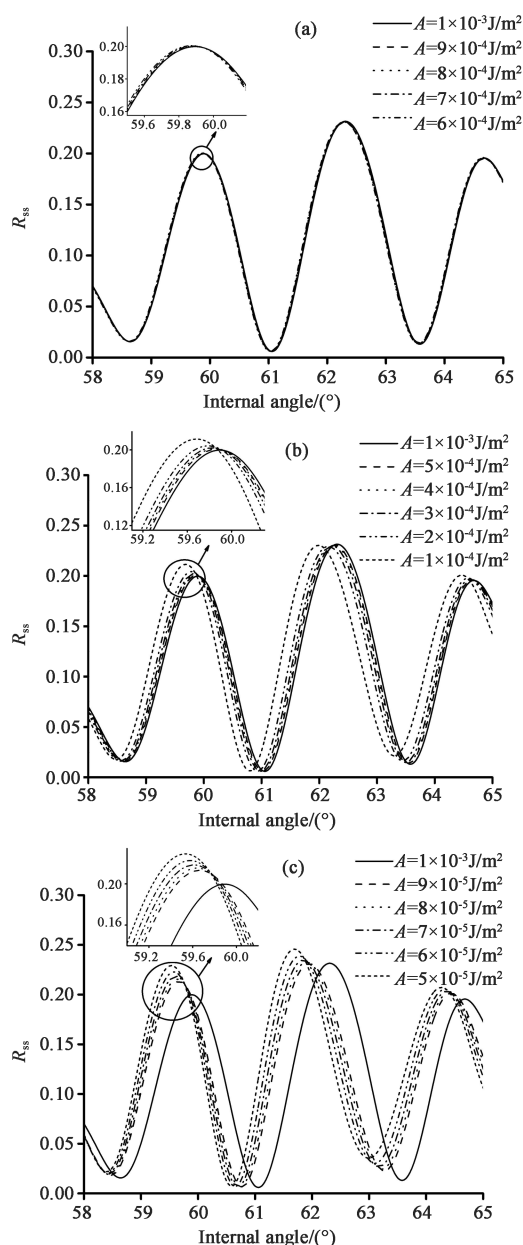


图 5 不同锚泊能强度下液晶全漏导模反射率 R_{ss} 随内角的变化. (a) $A = 6 \times 10^{-4} \text{ J/m}^2 \sim 9 \times 10^{-4} \text{ J/m}^2$; (b) $A = 1 \times 10^{-4} \text{ J/m}^2 \sim 5 \times 10^{-4} \text{ J/m}^2$; (c) $A = 5 \times 10^{-5} \text{ J/m}^2 \sim 9 \times 10^{-5} \text{ J/m}^2$.

Fig.5 Variation of the reflectivity R_{ss} of the fully leaky guided mode in liquid crystal with different anchoring energy strength. (a) $A = 6 \times 10^{-4} \text{ J/m}^2 \sim 9 \times 10^{-4} \text{ J/m}^2$; (b) $A = 1 \times 10^{-4} \text{ J/m}^2 \sim 5 \times 10^{-4} \text{ J/m}^2$; (c) $A = 5 \times 10^{-5} \text{ J/m}^2 \sim 9 \times 10^{-5} \text{ J/m}^2$.

的距离来确定基板表面锚泊能。为了确定上述变化规律,在锚泊能强度 $5 \times 10^{-5} \text{ J/m}^2 \sim 1 \times 10^{-3} \text{ J/m}^2$ 范围内选取了 15 个具体的锚泊能强度值进

行计算,结果如图 5 所示。类似于文献[15]中的处理,选取锚泊能强度为 $1 \times 10^{-3} \text{ J/m}^2$ 时 R_{ss} 曲线的第一个波峰点为参考点,其他锚泊能强度对应的 R_{ss} 曲线第一个波峰点与参考点比较移动的距离可以获得。采用相同的方法,分别获得以第二个波峰点和第三个波峰点为参考点时 R_{ss} 曲线移动的距离。根据这些数据很容易得到移动距离随锚泊能强度的变化,如图 6 所示。选取相同的参考点,随锚泊能强度的减小,移动距离逐渐增大;选取参考点不同时,相同的锚泊能强度下曲线左移的距离不同;从图像上不难看出对于选取的 3 个不同参考点,当锚泊能强度小于 $1 \times 10^{-4} \text{ J/m}^2$ 时,移动距离都变化较明显,对于此范围内的锚泊能强度的测量具有较高的灵敏度。

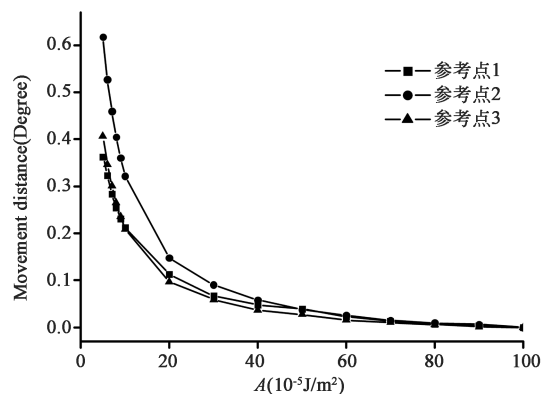


图 6 移动距离随锚泊能强度的变化

Fig.6 Dependence of movement distance with different anchoring energy strengths

4 结 论

本文依据液晶弹性理论和液晶多层光学理论,采用差分迭代方法数值计算得到不同锚泊强度的 PAN 盒中液晶指向矢的分布及 PAN 液晶全漏波导反射率 R_{ss} 随内角变化的理论曲线。基板表面锚泊能越弱,液晶指向矢的变化越明显,并且相对于强锚泊情形 ($1 \times 10^{-3} \text{ J/m}^2$),不同锚泊能强度 ($5 \times 10^{-5} \text{ J/m}^2 \sim 1 \times 10^{-3} \text{ J/m}^2$) 下的 R_{ss} 随内角变化曲线左移,移动距离与锚泊能强度有关。通过与选取参考点的比较,得到了 R_{ss} 曲线向左移动的距离与基板表面锚泊能强度的关系图,锚泊能强度小于 $1 \times 10^{-4} \text{ J/m}^2$ 时,移动距离变化比较明显,并且灵敏度较高,即液晶光导波技术比较适合测量该范围内的基板表面锚泊能强度。

参 考 文 献:

- [1] YANG D K, WU S T. *Fundamentals of Liquid Crystal Devices* [M]. 2nd ed. Chichester: John Wiley & Sons, 2014.
- [2] 唐先柱,彭增辉,刘永刚,等.非对称锚定制备均匀单畴排列铁电液晶器件[J].光学精密工程,2010,18(6): 1295-1302.
TANG X Z, PENG Z H, LIU Y G, *et al.* Fabrication of uniform mono-domain alignment ferroelectric liquid crystal devices by asymmetric boundary anchoring [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(6): 1295-1302. (in Chinese)
- [3] 岱钦,乌日娜,杨健,等.电场作用下染料掺杂液晶器件的激光辐射[J].光学精密工程,2011,19(7):1510-1514.
DAI Q, WU R N, YANG J, *et al.* Laser emission of dye-doped liquid crystal devices under applying voltage [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(7): 1510-1514. (in Chinese)
- [4] KARWIN C K, LIVESEY K L. Microwave properties of twisted and supertwisted nematic liquid crystals with weak anchoring [J]. *Liq. Cryst.*, 2014, 41(5): 707-716.
- [5] YUAN R, XING H Y, YE W J. Microwave modulation characteristics of twisted liquid crystals with chiral dopant [J]. *AIP Adv.*, 2017, 7(1): 015101.
- [6] 章岳光,李海峰,刘旭,等.垂直定向液晶光阀中液晶电光特性的理论分析[J].光学学报,1999,19(9):1170-1176.
ZHANG Y G, LI H F, LIU X, *et al.* Simulation of electric-optical properties of homotropic aligned liquid crystal light valves [J]. *Acta Opt. Sin.*, 1999, 19(9): 1170-1176. (in Chinese)
- [7] NIE X Y, WANG H Y, GE G B, *et al.* Polar anchoring energy measurement of vertically aligned liquid crystal cells [J]. *SID Symp. Dig. Tech. Pap.*, 2005, 36(1): 780-783.
- [8] HAO H M, LIU Y Y, ZHANG P, *et al.* Experimental design to measure the anchoring energy on substrate surface by using the alternating-current bridge [J]. *Chin. Phys. B*, 2017, 26(8): 086102.
- [9] BAEK S I, KIM S J, KIM J H. Measurement of anchoring coefficient of homeotropically aligned nematic liquid crystal using a polarizing optical microscope in reflective mode [J]. *AIP Adv.*, 2015, 26(9): 097170.
- [10] 余守宪.导波光学物理基础[M].北京:北京交通大学出版社,2002.
SHE S X. *The Basic Physics of Waveguide Optics* [M]. Beijing: Beijing Jiaotong University Press, 2002. (in Chinese)
- [11] YANG F Z, SAMBLES J R. *Guided Mode Studies of Liquid Crystal Layers* [M]. Oxford: Taloy and Francis Ltd, 2003: 2-3.
- [12] 谢毓章.液晶物理学[M].北京:科学出版社,1998.
XIE Y Z. *Physics of Liquid Crystal* [M]. Beijing: Science Press, 1998. (in Chinese)
- [13] BERREMAN D W. Optics in stratified and anisotropic media: 4×4 -matrix formulation [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1972, 62(4): 502-510.
- [14] 王谦,何赛灵.液晶指向矢分布的模拟和比较研究[J].物理学报,2001,50(5):926-932.
WANG Q, HE S L. Simulation and comparison study of liquid crystal director distributions [J]. *Acta Phys. Sin.*, 2001, 50(5): 926-932. (in Chinese)
- [15] XING H Y, YE W J, WU N F, *et al.* Exploration of the sum of flexoelectric coefficients of nematic liquid crystals [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2012, 10(5): 052301.

作者简介:孙婷婷(1992—),女,河北张家口人,硕士研究生,主要从事液晶与液晶器件物理方面的研究。E-mail: tingsunjjtola@163.com

叶文江(1976—),男,河北石家庄人,博士,副教授,主要从事液晶与液晶器件物理方面的研究。E-mail: wenjiang_ye@hebut.edu.cn