

文章编号:1007-2780(2018)01-0023-07

挠曲电效应对液晶微波相位调制的影响

李振杰,袁 瑞,孙婷婷,朱吉亮,叶文江*

(河北工业大学 理学院,天津 300401)

摘要:液晶微波调制器件的相位调制取决于液晶分子指向矢的分布。液晶指向矢的分布不仅会受基板表面处液晶分子预倾角和锚定能等因素的影响,液晶材料的挠曲电特性同样会影响液晶指向矢分布。基于液晶弹性理论和差分迭代方法,研究了挠曲电效应对平行排列向列相(PAN)液晶微波相位调制的影响,理论推导得到弱锚定 PAN 液晶盒的平衡态方程,数值模拟给出了不同的预倾角、锚定能和液晶材料的挠曲电特性条件下单位长度微波相移(MPSL)随电压的变化。结果表明 MPSL 随锚定能系数的减小而增大, $A_0 = A_d = 5 \times 10^{-5} \text{ J/m}^2$ 时,挠曲电效应 $e_{11} + e_{33} = 5 \times 10^{-11} \text{ C/m}$ 对 MPSL 最大可调范围为 20° , 0° 预倾角对 MPSL 最大可调范围为 17° , MPSL 差值最大增加均为 9° ; 预倾角为 3° 时, MPSL 可调范围随挠曲电系数的增大而增大,相对于忽略挠曲电效应情形,强锚定 $A_0 = A_d = 10^{-3} \text{ J/m}^2$ 条件下 MPSL 始终减小,弱锚定 $A_0 = A_d = 5 \times 10^{-5} \text{ J/m}^2$ 条件下 MPSL 先减小后增大然后再减小, MPSL 差值最大增加为 9° 。此项研究对液晶微波调制器件设计有一定的指导意义。

关键词: 挠曲电效应; 液晶微波相位调制; 单位长度相移; 液晶弹性理论; 差分迭代方法

中图分类号: O753.2 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/YJYXS20183301.0023

Influence of flexoelectric effect on the microwave phase modulation of liquid crystal

LI Zhen-jie, YUAN Rui, SUN Ting-ting, ZHU Ji-liang, YE Wen-jiang*

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

Abstract: The phase modulation of the liquid crystal microwave modulator depends on the distribution of the liquid crystal molecular director. The distribution of liquid crystal director is not only affected by these factors such as the pretilt angle of the liquid crystal molecules and the anchoring energy on the surface of the substrate. The flexoelectric effect of the liquid crystal material also affects the liquid crystal director distribution. Based on the elastic theory of liquid crystal and the finite-difference iterative method, the influence of flexoelectric effect on the microwave phase modulation of parallel aligned nematic (PAN) liquid crystal is studied. We get the equilibrium equations of the weak anchoring PAN

收稿日期:2017-07-14; 修订日期:2017-08-15.

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); 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: lizhenjieruning@163.com

cell. The numerical simulation shows the variation of microwave phase shift per unit length (MPSL) with voltage under different pretilt angles, anchoring energies and flexoelectric coefficients of the liquid crystal material. The results show that the MPSL increases with the decrease of anchoring energy. The maximum adjustable range of MPSL is 20° under $A_0 = A_d = 5 \times 10^{-5} \text{ J/m}^2$ when $e_{11} + e_{33} = 5 \times 10^{-11} \text{ C/m}$. Due to the flexoelectric effect, the maximum adjustable range of MPSL is 17° when the pretilt angle is 0° , and the maximum difference increase of MPSL is 9° . When the pretilt angle is 3° , the adjustable range of MPSL increases with the increase of $e_{11} + e_{33}$, and the MPSL always decreases under $A_0 = A_d = 10^{-3} \text{ J/m}^2$, while the MPSL first decreases, then increases, and eventually decreases under $A_0 = A_d = 5 \times 10^{-5} \text{ J/m}^2$. The maximum difference increase of MPSL is 9° relative to ignoring the flexoelectric effect. This study has some guiding significance for the design of liquid crystal microwave modulator.

Key words: flexoelectric effect; microwave phase modulation of liquid crystal; microwave phase shift per unit length; elastic theory of liquid crystal; the finite-difference iterative method

1 引言

液晶态在 1888 年被发现,直到 20 世纪 60 年代液晶才被广泛应用于显示领域,而随着研究的进一步深入,液晶在非显示领域的应用也取得了蓬勃发展,延伸到了微波领域。上世纪末,人们研究发现许多液晶材料在微波波段同样能够保持较大的双折射特性^[1],从而使液晶对微波的调制变成了现实,如液晶微波波长选择器^[2]、液晶微波波长束调制器等^[3]。

上述液晶微波调制器件采用铝基板,虽然其本身可以充当导电介质,但是由于铝材的韧性,器件容易发生形变,液晶层的厚度较厚,导致液晶的响应速度较慢,影响液晶对微波相位调制的快慢。因此,从器件结构上考虑,选用一般液晶显示器件用玻璃基板和降低液晶层的厚度是液晶微波调制器件研究的方向。Karwin C M 等人^[4]首先从理论上研究了强锚定扭曲向列相液晶对微波相位调制的影响,扭曲结构增加了液晶指向矢倾角,从而加大了液晶对微波的调制相位。基于此项研究, Karwin C K 等人^[5]研究了弱锚定扭曲和超扭曲向列相液晶的微波调制特性,不同基板的锚定强度对微波相位调制有明显的变化,随锚定强度的减弱调制的灵敏度增强,但是电压调节范围随之减小;Ye W J 等人^[6-7]先后研究了弱锚定无手性掺杂的扭曲向列相液晶的微波调制性能,分析了预倾角和预扭曲角对微波相位调制的影响,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° 扭曲向列相液晶盒是较好的选择;Yuan R 等人^[8]研究了手性掺杂的扭曲向列相液晶的微波调制性能,分别给出了扭曲、高扭曲和超扭曲向列相液晶最佳的螺距及手性剂掺杂浓度。无论是器件结构还是液晶材料,微波相位调制的改善与液晶指向矢倾角的分布密切相关,因此,改变液晶指向矢倾角的因素同样会对微波的调制特性产生影响,液晶的挠曲电特性就是如此。

液晶的挠曲电特性是指液晶展曲和弯曲形变引起的电极化,是普遍存在的一种现象,尤其是具有永久偶极矩的楔形和香蕉形向列相液晶。1969 年, Meyer R B^[9] 首先给出了挠曲电极化强度矢量表达式, $P = e_{11} \mathbf{n} (\nabla \cdot \mathbf{n}) + e_{33} (\nabla \times \mathbf{n}) \times \mathbf{n}$, 其中 $\mathbf{n}$ 为液晶指向矢、 e_{11} 和 e_{33} 分别对应展曲和弯曲挠曲电系数。挠曲电极化与外加电场的作用能够引起液晶指向矢的改变,此为挠曲电效应^[10], 这种效应很容易被介电效应、基板锚定作用掩盖,但在低频 ($< 10 \text{ Hz}$) 和直流电压信号作用下是比较明显的。崔文静等人^[11] 曾研究了挠曲电效应对平行排列向列相 (PAN) 液晶指向矢倾角的影响,考虑挠曲电效应,指向矢倾角也在增大。将其应用到液晶对微波的调制中,必然会增加微波调制的相位。本文研究了挠曲电效应引起的弱锚定 PAN 液晶指向矢分布导致微波相移的变化,首先对弱锚定 PAN 液晶盒系统进行理论分析,得到挠曲电影响下的体平衡态方程及边界条件,通过数值模拟计算出液晶挠曲电系数对微波相移的影响。

2 理论分析

考虑 PAN 液晶挠曲电效应对微波调制的影响,在不加电压和施加一定电压下 PAN 盒中液晶指向矢分布如图 1 所示。为了分析基板表面处理的影响,考虑弱锚定情形。不加电压时,如图 1(a)所示,PAN 盒中的液晶分子沿基板平面排列,上下基板表面处液晶分子有一个小的预倾角 θ_0 和 θ_d ,易取向方向分别为 $e_0 = (\cos\theta_0, 0, \sin\theta_0)$ 和 $e_d = (\cos\theta_d, 0, \sin\theta_d)$;施加超过阈值电压的某一电压时,如图 1(b)所示,液晶分子取向分布在外加电场、表面锚定及液晶挠曲电特性三者共同作用下将发生形变,用倾角 θ 来表示,因此液晶指向矢为 $n = (\cos\theta, 0, \sin\theta)$,这里假设 θ 只是坐标 z 的函数。通常情况下,液晶微波的介电各向异性随微波频率的增大而减小,当微波垂直穿过液晶层,若要产生足够的相移需要足够大的液晶层,这样驱动电压就会变得很大,即使能够使用很高的电压进行驱动,基板表面锚泊对液晶层中间区域的液晶分子作用也会很小,液晶层中间区域将会是杂乱的。但是,如果微波沿基板平面入射,不但可以满足微波传播距离的要求,而且液晶层厚度也会变薄,利于降低驱动电压。所以微波沿 x 轴方向传播,并分析单位长度微波相位(MPSL)变化来表征液晶挠曲电效应对微波相移的影响。

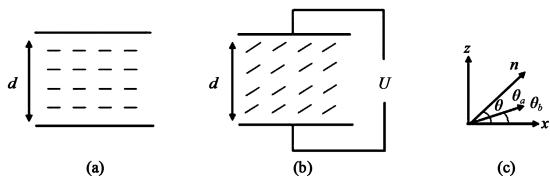


图 1 PAN 盒中液晶分子取向分布和坐标系;(a)未施加电压;(b)施加电压;(c)坐标系

Fig.1 Distribution of liquid crystal molecules in PAN cell and the coordinate system. (a) without an external voltage; (b) with an external voltage; (c) the coordinate system.

PAN 盒系统总自由能为

$$F = S \left\{ \int_0^d (F_{\text{elas}} + F_{\text{diel}} + F_{\text{flex}}) dz + (F_{s0} + F_{sd}) \right\}, \quad (1)$$

其中:

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

$f(\theta) = k_{11} \cos^2\theta + k_{33} \sin^2\theta$, k_{11} 和 k_{33} 分别是液晶材料的展曲和弯曲弹性常数;

$$F_{\text{diel}} = -\frac{1}{2} g(\theta) \left(\frac{d\varphi}{dz} \right)^2, \quad (3)$$

$g(\theta) = \epsilon_0 (\epsilon_{\perp} + \Delta\epsilon \sin^2\theta)$, ϵ_0 为真空介电常数, $\Delta\epsilon = \epsilon_{//} - \epsilon_{\perp}$ 为液晶的介电各向异性, φ 为液晶层上施加的电势;

$$F_{\text{flex}} = \frac{1}{2} (e_{11} + e_{33}) \sin 2\theta \frac{d\theta}{dz} \frac{d\varphi}{dz}, \quad (4)$$

$$F_{s0} = -\frac{1}{2} A_0 (\cos\theta_1 \cos\theta_0 + \sin\theta_1 \sin\theta_0)^2, \quad (5)$$

$$F_{sd} = -\frac{1}{2} A_d (\cos\theta_2 \cos\theta_d + \sin\theta_2 \sin\theta_d)^2, \quad (6)$$

其中: A_0 和 A_d 分别是下基板和上基板表面锚定强度系数, θ_1 和 θ_2 分别是下基板和上基板表面处液晶指向矢倾角, 即 $\theta_1 = \theta(0)$ 和 $\theta_2 = \theta(d)$;

通过变分原理^[12],可以得到液晶盒系统的平衡态方程为

$$2f(\theta) \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} + f'(\theta) \left(\frac{d\theta}{dz} \right)^2 + g'(\theta) \left(\frac{d\varphi}{dz} \right)^2 + (e_{11} + e_{33}) \sin(2\theta) \frac{d^2 \varphi}{dz^2} = 0, \quad (7)$$

$$g(\theta) \left(\frac{d^2 \varphi}{dz^2} \right) + g'(\theta) \left(\frac{d\theta}{dz} \right) \left(\frac{d\varphi}{dz} \right) - (e_{11} + e_{33}) \cos(2\theta) \left(\frac{d\theta}{dz} \right)^2 - \frac{1}{2} (e_{11} + e_{33}) \sin(2\theta) \left(\frac{d^2 \theta}{dz^2} \right) = 0, \quad (8)$$

边界条件为

$$f(\theta_1) \theta'_1 + \frac{1}{2} (e_{11} + e_{33}) \sin 2\theta_1 \frac{d\varphi}{dz} - \frac{1}{2} A_0 \sin 2(\theta_1 - \theta_0) = 0, \quad (9)$$

$$f(\theta_2) \theta'_2 + \frac{1}{2} (e_{11} + e_{33}) \sin 2\theta_2 \frac{d\varphi}{dz} + \frac{1}{2} A_d \sin(\theta_2 - \theta_d) = 0, \quad (10)$$

由式(7)~式(10)可以确定某一外加电压下液晶指向矢倾角 θ 的分布,于是可知穿过液晶层所产生的单位长度微波相移(MPSL)为

$$\Phi(U) = \frac{360f}{c} (\sqrt{\epsilon'_{\text{eff}}} - \sqrt{\epsilon'_{\perp}}) , \quad (11)$$

$$\frac{1}{\epsilon'_{\text{eff}}} = \frac{\cos^2 \theta}{\epsilon'_{\perp}} + \frac{\sin^2 \theta}{\epsilon'_{\parallel}} , \quad (12)$$

其中: f 为微波频率, c 为光速, ϵ'_{eff} 为液晶在微波波段的有效介电常数, $\epsilon'_{\parallel}$ 和 $\epsilon'_{\perp}$ 分别是液晶在微波波段平行和垂直于液晶分子长轴的介电常数。由于外加电压下液晶指向矢计算是通过分层处理, 每一液晶子层的指向矢倾角 θ 是不同的, 为了简化, 取沿 z 轴方向液晶子层指向矢倾角的平均值 θ_{average} 代替式(12)中的 θ , 得到下面的表达式。

$$\theta_{\text{average}} = \frac{1}{d} \int_0^d \theta(z) dz . \quad (13)$$

3 数值模拟

数值计算采用差分迭代方法^[13], 整个液晶盒沿 z 轴分成 N ($N=100$) 层, 将指向矢倾角 θ 中心差分形式和上下基板处的差分形式分别代入体平衡态方程和边界条件可以得到倾角 θ 的迭代格式, 通过计算机编程计算可以得到不同电压下液晶指向矢分布, 再由式(11)简单处理容易得到微波穿过液晶层的相移变化 MPSL。计算中使用液晶材料为 E7 液晶, 其材料参数^[14]如表 1 所示。

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	$\epsilon_{\parallel}$	$\epsilon_{\perp}$	$\epsilon'_{\parallel}$	$\epsilon'_{\perp}$
E7	11.1	10.0	17.1	19.0	5.2	3.24	2.78

数值模拟首先考虑不同挠曲电系数下基板表面液晶分子预倾角和基板锚定能对 MPSL 的影响, 初步验证挠曲电效应、预倾角、基板锚定能对微波器件调制特性的作用; 接下来具体计算在确定的预倾角和基板锚定能条件下, 挠曲电系数对 MPSL 的影响, 从而证明挠曲电效应对微波器件调制特性的重要性。

3.1 预倾角对微波相移的影响

固定下基板和上基板的锚定强度为 $A_0 = A_d = 5 \times 10^{-5} \text{ J/m}^2$ 条件时, 对应 3 个预倾角度, 分别是 0° 、 3° 和 10° , MPSL 与电压的变化关系如图 2 所示, 图 2(a) 为不考虑挠曲电效应情形, 图 2(b) 为 $e_{11} + e_{33} = 5 \times 10^{-11} \text{ C/m}$ 情形, 图 2(c) 为

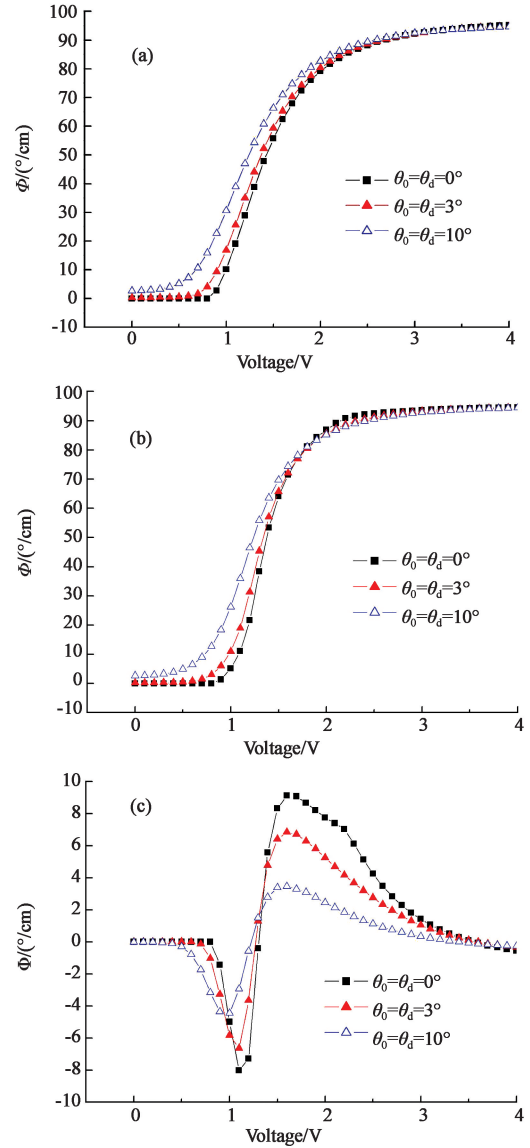


图 2 $A_0 = A_d = 5 \times 10^{-5} \text{ J/m}^2$ 时不同预倾角下 MPSL 及其差值随电压的变化. (a) $e_{11} + e_{33} = 0 \text{ C/m}$; (b) $e_{11} + e_{33} = 5 \times 10^{-11} \text{ C/m}$; (c) MPSL 差值随电压的变化。

Fig. 2 Variation of MPSL and the difference of MPSL with voltage for different pretilt angles under $A_0 = A_d = 5 \times 10^{-5} \text{ J/m}^2$. (a) $e_{11} + e_{33} = 0 \text{ C/m}$; (b) $e_{11} + e_{33} = 5 \times 10^{-11} \text{ C/m}$; (c) the difference of MPSL between (a) and (b).

(a) 和 (b) 两种情形的 MPSL 差值。随预倾角的增加, 由于低电压 (小于阈值电压) 微波相移的增加, 液晶可调微波相移的范围逐渐减小, 但是电压可调范围逐渐增大, 主要原因是预倾角的增加导

致阈值电压的降低。相对于忽略挠曲电效应情形,考虑挠曲电效应为 $e_{11} + e_{33} = 5 \times 10^{-11} \text{ C/m}$, 当电压小于 1.8 V 时 MP SL 是增加的, 大于 1.8 V 时 MP SL 减小, 如图 2(a) 和图 2(b) 所示, MP SL 最大可调范围为 17° , MP SL 差值最大能够增加 9° 左右, 对应 0° 预倾角情形, 如图 2(c) 所示, 这也证明了挠曲电效应对液晶微波调制的影响。

3.2 锚定能对微波相移的影响

为了分析锚定能对微波相移的影响, 假定上下基板预倾角为 3° , 改变基板的锚定强度分别为 10^{-3} J/m^2 、 10^{-4} J/m^2 和 $5 \times 10^{-5} \text{ J/m}^2$, 计算得到的 MP SL 及其差值随电压的变化曲线如图 3 所示。随锚定强度的减小, 微波相移可调范围及电

压可调范围都在增加, 如图 3(a) 所示。并且, 考虑挠曲电效应 $e_{11} + e_{33} = 5 \times 10^{-11} \text{ C/m}$, 只有当基板锚定能小到一定数值时, MP SL 在某个电压范围才会高于忽略挠曲电效应情形, 如图 3(b) 所示, MP SL 最大可调范围为 20° , MP SL 差值最大能够增加 7° 左右, 这是由于挠曲电效应与基板锚定效应对液晶指向矢分布影响导致的。

3.3 挠曲电效应对微波相移的影响

前面分析了预倾角和锚定能对 MP SL 的影响, 同时也对比说明挠曲电效应引起的变化。为了详细说明挠曲电效应对微波相移的影响, 取强锚定 ($A_0 = A_d = 10^{-3} \text{ J/m}^2$) 和弱锚定 ($A_0 = A_d = 5 \times 10^{-5} \text{ J/m}^2$) 两种情形作对比, 不同挠曲电系数下 MP SL 及其差值随电压的变化曲线如图 4 所示, 此时上下基板处液晶分子的预倾角均为 3° 。

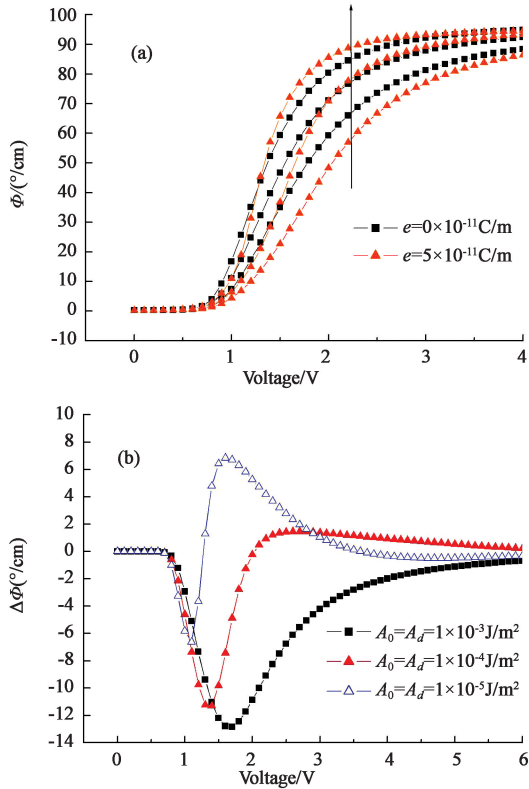
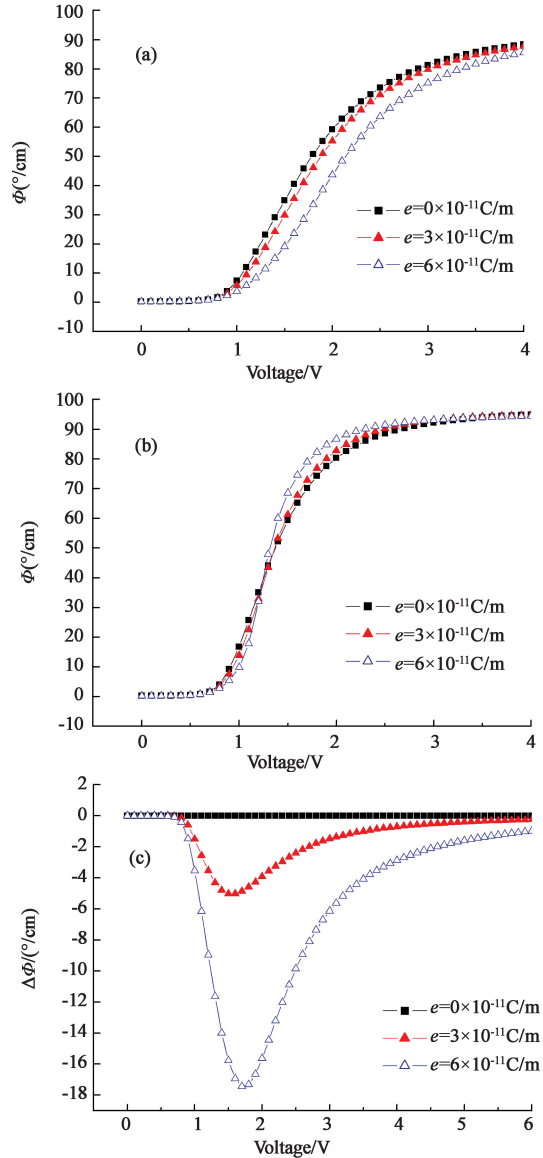


图 3 预倾角 3° 时不同锚定能下 MP SL 及其差值随电压的变化. (a) 沿箭头方向上下基板锚定能依次为 10^{-3} J/m^2 , 10^{-4} J/m^2 和 $5 \times 10^{-5} \text{ J/m}^2$; (b) MP SL 差值随电压的变化.

Fig.3 Variation of MP SL and difference of MP SL with voltage for different anchoring energy under $\theta = 3^\circ$. (a) the anchoring energies are respectively 10^{-3} J/m^2 , 10^{-4} J/m^2 and $5 \times 10^{-5} \text{ J/m}^2$ along the direction of the arrow; (b) the difference of MP SL between $e_{11} + e_{33} = 0 \text{ C/m}$ and $e_{11} + e_{33} = 5 \times 10^{-11} \text{ C/m}$.



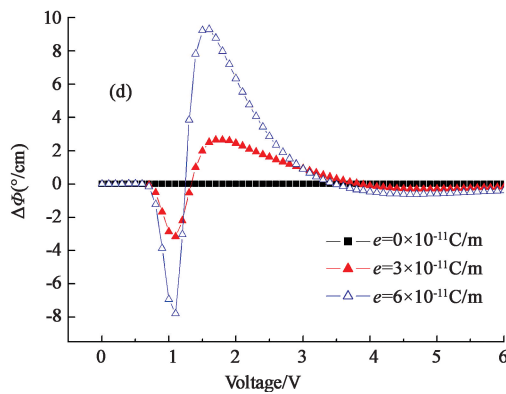


图 4 $\theta_0 = \theta_d = 3^\circ$ 时不同挠曲电系数下 MPSL 及其差值随电压的变化. (a) $A_0 = A_d = 10^{-3} \text{ J/m}^2$; (b) $A_0 = A_d = 5 \times 10^{-5} \text{ J/m}^2$; (c) $A_0 = A_d = 10^{-3} \text{ J/m}^2$ 时 MPSL 差值随电压的变化; (d) $A_0 = A_d = 5 \times 10^{-5} \text{ J/m}^2$ 时 MPSL 差值随电压的变化.

Fig.4 Variation of MPSL and difference of MPSL with voltage for different value of e under $\theta_0 = \theta_d = 3^\circ$. (a) $A_0 = A_d = 10^{-3} \text{ J/m}^2$; (b) $A_0 = A_d = 5 \times 10^{-5} \text{ J/m}^2$; (c) The difference of MPSL with voltage between $e_{11} + e_{33} = 0 \text{ C/m}$, $e_{11} + e_{33} = 3 \times 10^{-11} \text{ C/m}$ and $e_{11} + e_{33} = 6 \times 10^{-11} \text{ C/m}$ under $A_0 = A_d = 10^{-3} \text{ J/m}^2$; (d) The difference of MPSL with voltage between $e_{11} + e_{33} = 0 \text{ C/m}$, $e_{11} + e_{33} = 3 \times 10^{-11} \text{ C/m}$ and $e_{11} + e_{33} = 6 \times 10^{-11} \text{ C/m}$ under $A_0 = A_d = 5 \times 10^{-5} \text{ J/m}^2$.

对于强锚定,基板表面处液晶分子取向保持不变,挠曲电效应减小了液晶盒内部液晶分子的指向矢倾角,从而导致 MPSL 降低,如图 4(c)所示,MPSL

差值最大能够减少 18° 左右;对于弱锚定,挠曲电效应对基板表面处液晶分子取向的影响导致了 MPSL 相对于忽略挠曲电效应情形先减小后增大然后再减小,如图 4(d)所示,随锚定能系数的减小,MPSL 最大可调范围为 17° ,MPSL 差值最大能够增加 9° 左右。

4 结 论

本文利用差分迭代法结合液晶弹性理论,通过模拟计算分析了挠曲电系数、锚定能及预倾角对单位长度 PAN 液晶微波相移的影响。随基板锚定能的减小 MPSL 可调范围及电压可调范围都在增加,考虑挠曲电效应时,基板锚定能小到一定数值时,MPSL 才可能高于忽略挠曲电效应情形。MPSL 随预倾角的增大而增大,相对于不考虑挠曲电的情形,MPSL 最大可调范围为 17° ,MPSL 的差值最大为 9° 。弱锚定 $A_0 = A_d = 5 \times 10^{-5} \text{ J/m}^2$ 条件下,MPSL 随挠曲电系数的增大是先减小后增大再减小,并且转变电压在逐渐减小,相对于不考虑挠曲电的情形,MPSL 最大可调范围为 17° ,MPSL 的差值最大为 9° ;强锚定 $A_0 = A_d = 10^{-3} \text{ J/m}^2$ 条件下,MPSL 随挠曲电系数的减小而增大,相对于不考虑挠曲电的情形,MPSL 差值最大为 9° 。因此,为了改善液晶微波相移的调制范围,可以选择预倾角为 3° 、基板锚定能为 $A_0 = A_d = 5 \times 10^{-5} \text{ J/m}^2$ 的弱锚定 PAN 盒,同时灌注挠曲电系数较大的液晶材料。

参 考 文 献:

- [1] LIM K C, MARGERUM J D, LACKNER A M, et al. Liquid crystal birefringence for millimeter wave radar [J]. *Liquid Crystals*, 1993, 14(2): 327-337.
- [2] YANG F Z, SAMBLES J R. Microwave liquid crystal wavelength selector [J]. *Applied Physics Letters*, 2001, 79(22): 3717-3719.
- [3] YANG F Z, SAMBLES J R. Microwave liquid-crystal variable phase grating [J]. *Applied Physics Letters*, 2004, 85(11): 2041-2043.
- [4] KARWIN C M, LIVESEY K L. Liquid crystal phase shifters with a twist [J]. *Applied Physics Letters*, 2013, 103(6): 063508.
- [5] KARWIN C K, LIVESEY K L. Microwave properties of twisted and supertwisted nematic liquid crystals with weak anchoring [J]. *Liquid Crystals*, 2014, 41(5): 707-716.
- [6] YE W J, XING H Y, ZHOU X, et al. Influence of rubbing-alignment on microwave modulation induced by liquid crystal [J]. *AIP Advances*, 2015, 5(6): 067145.

- [7] 叶文江,王梦莹,邢红玉,等.弱锚泊对液晶微波相位调制的影响[J].物理学报,2015,64(19):194206.
YE W J, WANG M Y, XING H Y, *et al.* Influence of weak anchoring on the microwave phase modulation of liquid crystals [J]. *Acta Physics Sinica*, 2015, 64(19): 194206. (in Chinese)
- [8] YUAN R, XING H Y, YE W J. Microwave modulation characteristics of twisted liquid crystals with chiral dopant [J]. *AIP Advances*, 2017, 7(1): 015101.
- [9] MEYER R B. Piezoelectric effects in liquid crystals [J]. *Physical Review Letters*, 1969, 22(18): 918-921.
- [10] 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)
- [11] 崔文静,邢红玉,张艳君,等.挠曲电效应对向列相液晶盒电容的影响[J].数值计算与计算机应用,2012,33(2): 129-137.
CUI W J, XING H Y, ZHANG Y J, *et al.* Influence of the flexoelectric effect on the capacitance of nematic liquid crystal cell [J]. *Journal on Numerical Methods and Computer Applications*, 2012, 33(2): 129-137. (in Chinese)
- [12] 叶文江,张志东,邢红玉.平行排列液晶盒的挠曲电效应及一级 Fréedericksz 转变[J].液晶与显示,2005,20(3): 229-234.
YE W J, ZHANG Z D, XING H Y. Flexoelectric effect in horizontal oriented LC cell and first-order Fréedericksz transition [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2005, 20(3): 229-234. (in Chinese)
- [13] 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 Physics Sinica*, 2001, 50(5): 926-932. (in Chinese)
- [14] BULJA S, MIRSHEKAR-SYAHKAL D, JAMES R, *et al.* Measurement of dielectric properties of nematic liquid crystals at millimeter wavelength [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2010, 58(12): 3493-3501.

作者简介:李振杰(1993—),男,山东菏泽人,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: lizhen-jieruning@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