

doi:10.3788/gzxb20144312.1231003

全漏光导波技术确定液晶材料的挠曲电系数

郑桂丽^{1,2,3}, 张辉³, 叶文江³, 张志东³, 宋宏伟⁴, 宣丽¹

(1 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 应用光学国家重点实验室, 长春 130033)

(2 中国科学院大学, 北京 100049)

(3 河北工业大学 理学院, 天津 300401)

(4 吉林大学 电子科学与工程学院, 长春 130021)

摘 要:利用全漏光导波技术,测量负性向列相液晶材料 MS-N01300-000 的展曲和弯曲挠曲电系数之和。根据液晶弹性和多层光学理论得到同一电压下不同挠曲电系数的反射率随内角(入射到液晶层角度)的理论变化曲线。实验中,将液晶材料灌注到混合排列向列相液晶盒中,在液晶盒上分别加交流电和直流电,采用全漏光导波技术得到反映液晶指向矢分布的液晶波导反射率随内角变化曲线。实验发现,由于液晶挠曲电作用,同一电压值下反射率随内角变化曲线发生微小移动。对比理论与实验曲线,由曲线移动距离得到 MS-N01300-000 液晶材料展曲和弯曲挠曲电系数之和为 2.5×10^{-11} C/m。

关键词:光导波技术;负性向列相液晶;挠曲电系数;混合排列向列相;弹性理论;多层光学理论

中图分类号:O753+.2

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2014)12-1231003-5

Determination of the Flexoelectric Coefficient in Liquid Crystal Using Fully-leaky Optical Guided Wave Technique

ZHENG Gui-li^{1,2,3}, ZHANG Hui³, YE Wen-jiang³, ZHANG Zhi-dong³, SONG Hong-wei⁴, XUAN Li¹

(1 State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

(2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

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

(4 College of Electronic Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130021, China)

Abstract: The fully-leaky optical guided wave technique was employed to measure the sum of splay and bend of flexoelectric coefficients in the negative nematic liquid crystal MS-N01300-000. The curves of reflectivity versus the internal angle (the angle of incident light to liquid crystal) with different flexoelectric coefficients under the same value of voltage can be calculated by the elastic theory of liquid crystal and the multi-layer optical theory. The director profile of the mentioned liquid crystal parameter filled in hybrid aligned nematic liquid crystal cell for different external applied voltages can be reflected by the curves of reflectivity versus the internal angle using the fully-leaky optical guided wave technique experimentally. There is a small move for the curves of reflectivity versus internal angle when alternating current voltage or direct current voltage with the same value is applied to the hybrid aligned nematic liquid crystal cell, which is induced by the flexoelectricity of liquid crystal. The approximate value of the sum of splay and bend of flexoelectric coefficient of MS-N01300-000 is 2.5×10^{-11} C/m by comparing theoretical results with experimental data.

Key words: Optical guided wave technique; Negative nematic liquid crystal; Flexoelectric coefficient; Hybrid aligned nematic; Elastic theory; Multi-layer optical theory

OCIS Codes: 160.3710; 310.2785; 230.3720; 230.4170

基金项目:国家自然科学基金(Nos. 11374087, 11274088, 11304074)、河北省自然科学基金(No. A2014202123)、河北省教育厅项目(Nos. Z2012061, Z2012067, QN2014130)和河北省高校重点学科资助

第一作者:郑桂丽(1981-),女,实验师,硕士研究生,主要研究方向为液晶物理。Email:guili0919@163.com

导师(通讯作者):张志东(1961-),男,教授,博士,主要研究方向为液晶物理。Email:zhidong_zhang1961@163.com

收稿日期:2014-05-16;录用日期:2014-08-07

<http://www.photon.ac.cn>

0 引言

目前,液晶显示器因其驱动电压小、功耗低、便携以及能够实现各种尺寸显示等优点而广泛地应用于日常工作和生活中.液晶显示器的显示原理是在外加电场作用下改变液晶分子指向矢的变化,显示效果取决于液晶材料以及液晶器件的不同.

负性向列相液晶具有良好的材料特性,广泛应用于解决广视角问题的垂直排列(Vertical Aligned,VA)模式、具有较宽视角和较快响应的共面转化(In-Plane Switching,IPS)模式以及制造大屏幕的电控双折射(Electrically Controlled Birefringence,ECB)模式等显示模式中^[1-2].在外加电场作用下,影响液晶指向矢的因素除了介电效应之外还有挠曲电效应,它是由于液晶分子的展曲或弯曲形变引起的液晶极化与电场相互作用对液晶分子形变产生的影响.这是一种普遍存在的效应,尤其是具有永久偶极矩的楔形或香蕉形液晶分子发生的展曲或弯曲形变^[3].挠曲电效应对液晶中指向矢分布、电光特性、阈值电压、视角特性等产生影响的程度取决于液晶的挠曲电系数,因此,确定液晶的挠曲电系数是非常必要的.自从1969年,Meyer首次对这种效应提出解释模型以来,对挠曲电效应的研究就没有间断过,其中应用各种方法测量液晶材料挠曲电系数就是一个主要的方面^[4-9].近几年来,国际上对弯曲芯型向列相(Bent-Core Nematic,BCN)液晶的挠曲电系数的测量结果远大于传统的测量结果^[10-12],掀起了人们对挠曲电效应研究的新一轮热潮,开始探索新的测量挠曲电系数的方法.混合排列向列相(Hybrid Aligned Nematic,HAN)液晶盒因其上下边界处液晶分子排列的不对称性而经常用于测量挠曲电系数^[6-9].

全漏液晶光导波技术通过测量不同入射角的线偏振光(p光或s光)在液晶盒内传播后的反射率或透射率实现对液晶及液晶器件准确的光学测量,曾用于研究向列相液晶分子的指向矢分布、方位锚定能、液晶的动力学行为、铁电液晶的光学特性、挠曲电系数的测量等^[1,5-6,13-17].其中文献[6]应用全漏光导波技术用直流和交流电下透过率的数据得到相应指向矢的分布,通过比较指向矢分布曲线来确定正性液晶材料E7的挠曲电系数 $e_1 + e_3$ 的值.本文在此基础上对实验装置进一步调整,利用全漏液晶光导波技术测得HAN液晶盒外加同一电压值下的交流电(频率为1000 Hz)和不同方向直流电三种情况下的反射率随内角的变化曲线,与不同挠曲电系数下的理论曲线相比较确定负性向列相液晶材料MS-N01300-000的展曲和弯曲挠曲电系数之和 $e_1 + e_3$ 的值.

1 理论过程

在强锚定边界条件下厚度为 d 的HAN液晶盒

中,液晶分子的取向在一个基板表面是平行的而在另一基板表面是垂直的,且在两基板之间分子排列连续变化,在垂直于液晶盒表面的方向加一电压 U ,其结构及建立的坐标系如图1.液晶指向矢和电场强度表示为

$$\mathbf{n} = (\cos \theta, 0, \sin \theta) \quad (1)$$

$$\mathbf{E} = (0, 0, \frac{dU}{dz}) \quad (2)$$

式中 θ 为液晶指向矢与 x - y 平面之间的夹角,且只依赖于坐标 z ,即 $\theta = \theta(z)$.

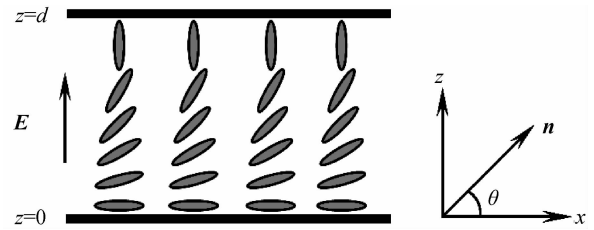


图1 HAN液晶盒以及指向矢的分布

Fig. 1 HAN liquid crystal cell and director in the coordinate

在外电场作用下,不考虑挠曲电效应时体系总自由能为 $f_{total} = f_{elas} + f_{diel}$,其中Frank弹性自由能密度为

$$f_{elas} = \frac{1}{2} K_{11} \cos^2 \theta \left(\frac{d\theta}{dz} \right)^2 + \frac{1}{2} K_{33} \sin^2 \theta \left(\frac{d\theta}{dz} \right)^2 \quad (3)$$

K_{11} 和 K_{33} 分别为液晶材料的展曲和弯曲弹性常数.介电引起的自由能密度为

$$f_{diel} = -\frac{1}{2} \epsilon_0 [\epsilon_{\perp} \mathbf{E} + \Delta \epsilon (\mathbf{n} \cdot \mathbf{E}) \mathbf{n}] \cdot \mathbf{E} \quad (4)$$

\mathbf{D} 为电位移矢量, ϵ_0 为真空介电常数, $\Delta \epsilon = \epsilon_{//} - \epsilon_{\perp}$ 为液晶材料的介电各向异性, $\epsilon_{//}$ 和 ϵ_{\perp} 分别为平行和垂直于液晶分子长轴方向的介电常数.考虑挠曲电效应时体系总自由能为 $f_{total} = f_{elas} + f_{diel} + f_{flex}$,其中挠曲电引起的自由能密度为

$$f_{flex} = -[e_1 (\nabla \cdot \mathbf{n}) \mathbf{n} + e_3 (\nabla \times \mathbf{n}) \times \mathbf{n}] \cdot \mathbf{E} \quad (5)$$

e_1 和 e_3 分别为展曲和弯曲挠曲电系数.强锚定边界条件下,HAN液晶盒的边界条件为

$$\theta(0) = 0, \theta(d) = \pi/2 \quad (6)$$

因为液晶盒的边界为强锚定,且在小电压作用的情况,在总自由能中没有考虑表面极化引起的表面能的作用^[18].应用欧-拉方程可以得到平衡态下系统满足的方程,通过数值计算可以得到考虑挠曲电和不考虑挠曲电两种情况下液晶指向矢的分布.液晶材料展曲和弯曲挠曲电系数之和 $e_1 + e_3$ 对指向矢有直接影响, $e_1 + e_3$ 取不同的值指向矢的分布也会随之变化.液晶指向矢分布一旦确定,就可以通过液晶多层光学理论得到不同入射角度下光通过液晶层的反射率和透射率.

2 实验过程

实验上采用棱镜耦合法实现光在液晶中的传播,

液晶盒波导结构如图 2. 将灌有负性液晶材料 MS-N01300-000 的 HAN 液晶盒置于两个棱镜之间, 棱镜和液晶盒上下玻璃基板之间有折射率为 1.52 的匹配液. 当偏振光以一定角度(外角)入射到棱镜耦合系统时, 折射光进入到上棱镜, 再通过纳米级的透明导电膜氧化铟锡(Indium Tin Oxide, ITO)和取向层聚酰亚胺(Polyimide, PI)进入到液晶层, 然后再透过上下基板的 PI 和 ITO, 最后反射光和透射光通过棱镜耦合射出. 根据斯涅尔(Snell)定律, 棱镜内的入射角(内角) θ_p 与外入射角 θ 的关系为

$$\theta = \sin^{-1} \left[\frac{n_p}{n_0} \sin \left(\frac{\pi}{2} - \theta_p - \frac{\gamma}{2} \right) \right] \quad (7)$$

式中 γ 是棱镜的底角, n_p 和 n_0 分别为棱镜和空气的折射率. 实验使用的棱镜为等边梯形棱镜, 底角 $\gamma = 60^\circ$, 折射率 $n_p = 1.52, n_0 = 1$.

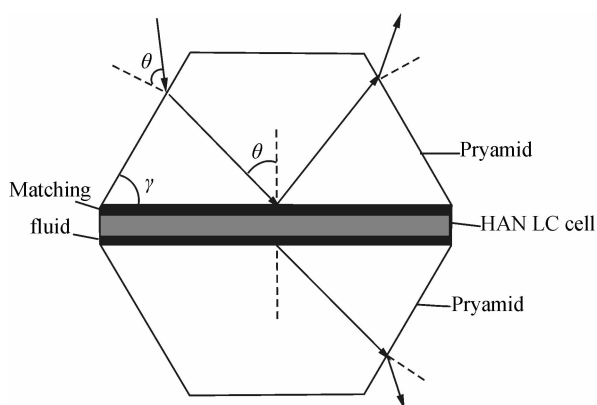


图 2 棱镜耦合波导几何结构

Fig. 2 The geometric structure of pyramid-coupled waveguide

实验中所用的负性液晶材料 MS-N01300-000 和 HAN 液晶盒分别由河北迈尔斯通电子材料有限公司和河北冀雅电子有限公司提供. 液晶和液晶盒的相关

参数如表 1, 其中 n_o 和 n_e 分别为寻常光和非寻常光折射率.

表 1 负性液晶 MS-N01300-000 和 HAN 液晶盒的参数
Table 1 The parameter of negative nematic liquid crystal MS-N01300-000 and HAN cell

The parameter of MS-N01300-000		The parameter of HAN cell	
$K_{11} = 24.1 \text{ pN}$	Thickness of cell	$d = 3.150 \pm 0.02 \mu\text{m}$	
$K_{33} = 17.0 \text{ pN}$	ITO	$n_o = n_e = 1.897$	$d = 32 \text{ nm}$
$\epsilon_{//} = 3.27$	PI of lower substrate	$n_o = n_e = 1.570 \pm 0.06$	
$\epsilon_{\perp} = 5.66$		$d = 65 \text{ nm}$	
$\Delta\epsilon = -2.39$	PI of upper substrate	$n_o = 1.500 \pm 0.003$	
$n_o = 1.493 \pm 0.001$		$n_e = 1.553 \pm 0.002$	
$n_e = 1.585 \pm 0.002$		$d = 65 \text{ nm}$	
$\Delta n = 0.092$			

实验装置如图 3, 其中使用氦氖激光 ($\lambda = 632.8 \text{ nm}$) 作为光源. 与文献[6]的实验装置相比, 在光路中增加了两个透光孔、一个偏振片和一个 1/4 波片. 其中透光孔的作用是保证光路的准直; 偏振片和 1/4 波片的作用是在选择入射光的偏振态(p 光或 s 光)之前把光调整为圆偏振光, 使入射到液晶波导结构的入射光无论为 p 光还是 s 光的光强基本不变. 基本的实验过程是控制一束线偏振光(p 光和 s 光)以一定的角度经棱镜耦合进入液晶盒, 转动 θ 转台同时探测与入射角有关的反射光的强度, 利用式(6)将反射光随外角的变化曲线转化成反射光随内角的变化曲线. 这样就可以精确地记录下一个入射角度范围内与内角有关的反射信号. 通过调节偏振片 2 和偏振片 3 的角度, 可以得到一组反射偏振保存信号(R_{ss} 和 R_{pp})和一组反射偏振转换信号(R_{sp} 和 R_{ps}). 液晶指向矢分布不同, 这些信号也不同, 即这些信号反映液晶指向矢的分布.

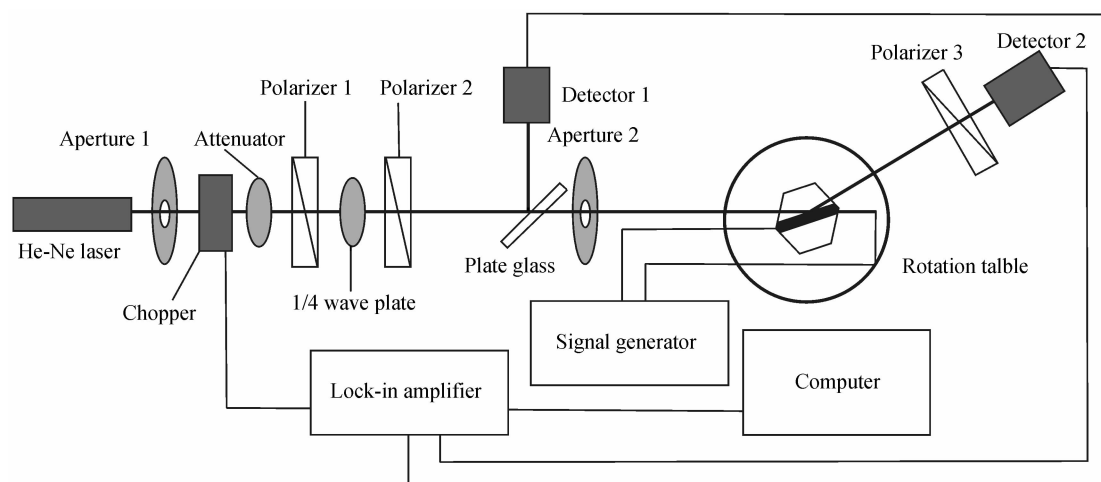


图 3 实验装置图

Fig. 3 The schematic of the experiment installation

3 结果与分析

对于 HAN 液晶盒而言,偏转转换信号 R_{sp} 和 R_{ps} 非常弱,所以在实验中只测量反射光的偏振保存信号 R_{ss} 和 R_{pp} ^[19]. 实验发现不同交流电压下 R_{ss} 信号基本没有变化,而 R_{pp} 信号变化明显而且有规律,说明实验中的棱镜耦合系统对 s 光不敏感而对 p 光敏感,所以只针对 R_{pp} 信号来研究. 图 4 给出液晶盒上加 0.0 V~7.0 V 交流电(频率为 1 000 Hz)时 R_{pp} 信号随内角的变化情况,其中图标 VA 表示外加交流电时对应的情况.

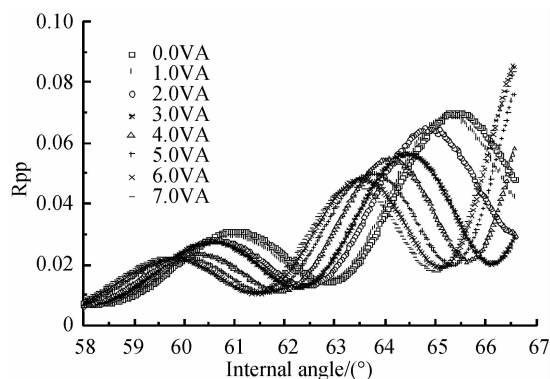


图 4 0.0 V~7.0 V 交流电下 R_{pp} 随内角的实验曲线
Fig. 4 The experimental curves of R_{pp} vs internal angle for applied alternating current voltages of 0.0 V~7.0 V

通过实验得到了在 HAN 液晶盒上加 0.5 V, 0.8 V, 1.0 V, 1.2 V 交流电、直流电以及反向直流电下的 R_{pp} 信号随入射内角变化的曲线. 实验曲线表明交流电和直流电两种情况下曲线发生微小的移动. 典型的实验数据(1.0 V), 交流电、直流电以及反向直流电下 R_{pp} 信号随入射内角变化的曲线如图 5, 图中插图为 R_{pp} 信号最大值处的放大图, 图标 VA、VD 和 -VD 分别表示外加交流电、直流电和反向直流电三种情况下的曲线. 通过液晶的弹性理论和多层光学理论可以得出同一电压值下不同 $e_1 + e_3$ 值的情况下反射率

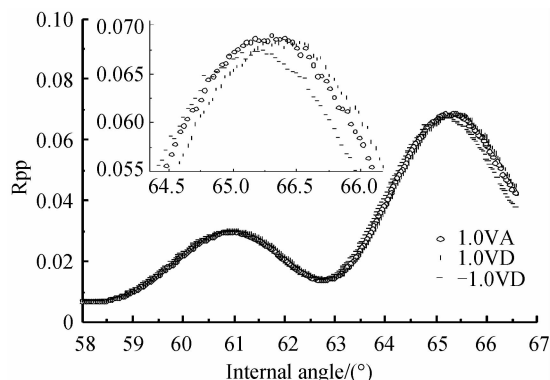


图 5 1.0 V 交流电和直流电下 R_{pp} 随内角的实验曲线
Fig. 5 The experimental curves of R_{pp} vs internal angle for applied alternating current voltage and direct current voltage of 1.0 V

随内角变化的曲线,图 6 为在正负 1.0 V 直流电两种情况下 $e_1 + e_3$ 的值分别取 0.0×10^{-11} C/m ~ 4.0×10^{-11} C/m 时的理论曲线,变化趋势和实验曲线一致. 将它们和实验曲线进行比较,可得液晶材料挠曲电系数 $e_1 + e_3$ 的值在 2.5×10^{-11} C/m 左右. 图 7 所示为 $e_1 + e_3$ 的值取 2.5×10^{-11} C/m 的理论曲线与实验曲线比较,得到的理论曲线和实验曲线基本一致. 这样就可以确定这种负性液晶材料 MS-N01300-000 的 $e_1 + e_3$ 的值约为 2.5×10^{-11} C/m.

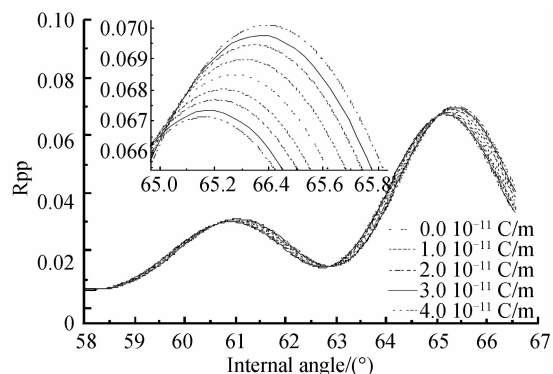


图 6 电压为 1.0 V 挠曲电系数 $e_1 + e_3$ 取不同值的理论曲线
Fig. 6 The theoretical curves for different $e_1 + e_3$ under 1.0 V

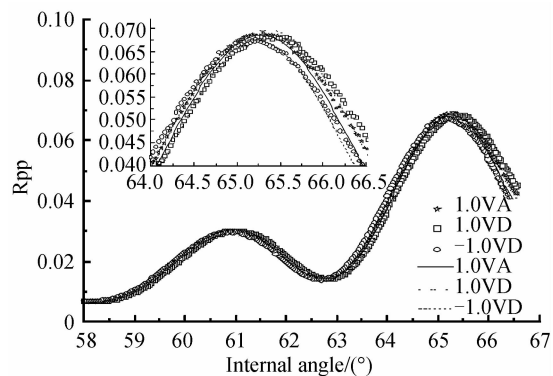


图 7 电压为 1.0 V 挠曲电系数 $e_1 + e_3$ 取 2.5×10^{-11} C/m 的理论曲线和实验曲线对比
Fig. 7 The experimental curves and fitted theoretical ones for $e_1 + e_3$ is 2.5×10^{-11} C/m under 1.0 V

4 结论

介绍了挠曲电效应以及光导波技术的实验过程,应用全漏光导波技术测量负性液晶材料的挠曲电系数 $e_1 + e_3$. 通过对液晶盒外加交流和直流电,利用液晶全漏光导波方法不仅在实验上验证了负性向列液晶材料 MS-N01300-000 中挠曲电效应的存在,并且通过将实验曲线与不同挠曲电系数下的理论曲线相比较得到负性向列液晶材料 MS-N01300-000 的展曲和弯曲挠曲电系数之和 $e_1 + e_3$ 的值在 2.5×10^{-11} C/m 左右. 这一结果在一般液晶材料挠曲电系数值的大小范围之内.

参考文献

- [1] WU N F, YE W J, LI Z G, *et al.* Guidewave studies of inverse twisted nematic liquid crystal [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystal and Display*, 2012, **27**(3): 281-287.
武乃福, 叶文江, 李志广, 等. 反扭曲向列相液晶的导波研究 [J]. *液晶与显示*, 2012, **27**(3): 281-287.
- [2] YU G L, ZHENG C W, HUA R M, *et al.* Preparation and characteristics of terminal alkeny-bearing lateral fluoro-benzene negative liquid crystal [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystal and Display*, 2013, **28**(4): 510-515.
员国良, 郑成武, 华瑞茂, 等. 含链端烯基负性液晶单体的合成及其性能研究 [J]. *液晶与显示*, 2013, **28**(4): 510-515.
- [3] 谢毓章. 液晶物理学 [M]. 北京: 科学出版社, 1998.
- [4] TAKANISHI T, HASHIDATE S, NISHIJOU S, *et al.* Novel measurement method for flexoelectric coefficients of nematic liquid crystal [J]. *Japanese Journal of Applied Physics Part 1*, 1998, **37**(4): 1865-1869.
- [5] MAZZULLA A, CIUCHI F, JEWELL S A. Optical determination of flexoelectric coefficients and surface polarization in a hybrid aligned nematic cell [J]. *Physical Review E*, 2001, **64**(021708).
- [6] JEWELL S A, SAMBLES J R. Fully leaky guided mode study of the flexoelectric effect and surface polarization in a hybrid aligned nematic cells [J]. *Journal of Applied Physics*, 2002, **92**(1): 19-24.
- [7] KISCHKA C, ELSTON S J, RAYNES E P. Measurement of the sum ($e1 + e3$) of the flexoelectric coefficients $e1$ and $e3$ of nematic liquid crystal using a hybrid aligned (HAN) cell [J]. *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, 2008, **494**: 93-100.
- [8] BENJAMIN I O, ELSTON S J. Determination of flexoelectric coefficients in nematic liquid crystals using the crystal rotation method [J]. *Liquid Crystals*, 2012, **39**(2): 149-156.
- [9] JEWELL S A, SAMBLES J R. Fully-leaky guided mode measurement of the flexoelectric coefficient ($e11 + e33$) of a nematic liquid crystal [J]. *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, 2003, **401**: 67-73.
- [10] HONG S H, VERDUZCO R, Gleeson J T, *et al.* Nanostructures of liquid crystal phases in mixtures of bent-core and rod-shaped molecules [J]. *Physical Review E*, 2011, **83**(6): 061702.
- [11] KUMAR P, MARINOV Y G, Hinov H P, *et al.* Converse flexoelectricity effect in bent-core nematic liquid crystals [J]. *Journal of Physical Chemistry B*, 2009, **113**(27): 9168-9174.
- [12] HARDEN J, MBANGA B, ÉBER N, *et al.* Giant flexoelectricity of bent-core nematic liquid Crystals [J]. *Physical Review Letters*, 2006, **97**(15): 157802.
- [13] LI ZH G, WANG X, YE W J, *et al.* Application guided wave method in testing for a vertical aligned liquid crystal cell [J]. *Optik*, 2012, **124**(15): 2191-2195.
- [14] ZHANG ZH D, SI L B, YE W J. Guided wave studies of reflective MTN liquid crystal cell [J]. *Journal of Modern Physics*, 2012, **3**(10): 1586-1591.
- [15] YANG F Z, SAMBLES J R, DONG Y M, *et al.* Fully-leaky guided wave determination of the polar anchoring energy of a homogeneously aligned nematic liquid crystal [J]. *Journal of Applied Physics*, 2000, **87**(6): 2726-2735.
- [16] SAMBLES J R, RUAN L Z. Testing the dynamic theory of nematics using fully-leaky guided modes and a convergent beam system [J]. *Journal of Non-newtonian Fluid Mechanics*, 2004, **119** (1-3): 39-49.
- [17] HAVÉ K, LAGERWALL S T, SAMBLES J R. Orthoconic antiferroelectric liquid crystal studied by the fully leaky guided mode technique [J]. *Journal of Applied Physics*, 2002, **91** (12): 9667-9675.
- [18] KIRKMAN N T, STIRNER T, HAGSTON W E. Continuum modeling of hybrid-aligned nematic liquid crystal cell: optical response and flexoelectricity-induced voltage shift [J]. *Liquid Crystals*, 2010, **30**(9): 1115-1122.
- [19] XING H Y, YE W J, SI L B, *et al.* Influence of flexoelectric effect on the guided mode of hybrid-aligned nematic liquid crystal [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, **33**(2): 0223002(1-7).
邢红玉, 叶文江, 司立彬, 等. 混合排列向列相液晶导模中挠曲电效应的影响 [J]. *光学学报*, 2013, **33**(2): 0223002(1-7).