

文章编号:1007-2780(2012)03-0281-07

反扭曲向列相液晶的导波研究

武乃福, 叶文江, 李志广, 张志东*

(河北工业大学 理学院, 天津 300401, E-mail: woodknife00@163. com)

摘 要: 利用全漏导波技术对反扭曲向列相负性液晶盒进行了研究, 通过测量液晶盒全漏波导几何结构在不同电压作用下随内角变化的反射光强, 并与理论模拟进行对比和拟合来确定液晶及液晶盒的多项参数, 进而探究反扭曲向列相液晶盒内部液晶指向矢分布的信息。

关 键 词: 全漏导波技术; 负性液晶; 反扭曲向列相; 指向矢

中图分类号: O753. 2; TN252 **文献标识码:** A **DOI:** 10. 3788/YJYXS20122703. 0281

Guidewave Studies of Inverse Twisted Nematic Liquid Crystal

WU Nai-fu, YE Wen-jiang, LI Zhi-guang, ZHANG Zhi-dong*

(School of Science, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China, E-mail: woodknife00@163. com)

Abstract: Using the fully-leaky waveguide technique, the inverse twisted nematic (ITN) negative liquid crystal cell is investigated. The intensity of reflected light dependent on the internal angle through the fully-leaky liquid crystal waveguide geometry is obtained from experiment with various voltages. Compared with theoretical result, some parameters of liquid crystal material and liquid crystal cell are determined, and then the information of liquid crystal director within the liquid crystal cell is also obtained.

Key words: fully-leaky waveguide technique; inverse twisted nematic; negative liquid crystal; director

1 引 言

液晶显示器作为当前最有活力的电子产品显示界面其应用十分广泛, 而液晶作为现代显示的应用材料以其驱动电压低、功耗微小、可以制成各种规格和类型的便于携带的液晶显示器等优势成为液晶显示器件的核心之一。液晶的光学性能以及其分子的排布情况影响和决定着液晶显示器件的特性与品质, 所以成为在设计显示器件时必须要考虑的重要因素^[1-2]。但是液晶分子以及液晶器件的不同却会导致不同的显示效果, 其中在对

比度等方面有明显优势的负性液晶显示面板成为了当下关注的热点^[3]。

为解决对实际中的液晶及液晶盒的准确的光学测量, 英国 Exeter 大学杨傅子教授首次提出偏振转换全反射谱 (Polarization conversion total reflection -PCTR) 方法应用到光导波领域, 用半漏光导模 (Half-leaky guided mode-HLGM) 技术以及全漏光导模 (Fully leaky guided mode-FLGM)^[4] 技术来测量液晶薄膜的光学结构, 实现了利用光学全反射的方法来探测光学各向异性晶体的光学特性的重要突破。

收稿日期: 2011-11-25; 修订日期: 2012-03-02

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 11147103, No. 10974042); 河北省自然科学基金 (No. A2010000004); 河北省教育厅基金 (No. Z2011133); 河北省高校重点学科资助项目

作者简介: 武乃福 (1986—), 男, 山东聊城人, 硕士研究生, 主要从事液晶物理和液晶器件物理研究。

* 通讯联系人, E-mail: zhidong_zhang@eyou. com

本文通过全漏光导波实验与液晶光学理论模拟相结合,研究了反扭曲向列相液晶盒(灌注液晶为负性液晶)的静态导波特性和,来获取液晶盒内液晶分子指向矢分布的详细信息,进一步测量得到液晶以及液晶盒的多项重要参数。

2 原 理

2.1 反扭曲向列相模式

反扭曲向列相(ITN)液晶显示模式如图 1 所示,基板表面的取向层是垂面取向的,以使液晶分子在没有外电场的作用时能均匀的沿取向层方向分布^[5]。两块基板之间填充负介电各向异性的液晶,即平行于长轴的介电常数 $\epsilon_{//}$ 比垂直于长轴的介电常数 $\epsilon_{\perp}$ 要小,即 $\epsilon_{//}-\epsilon_{\perp}<0$ 。此时,当液晶盒两侧的偏光片正交时,这个液晶器件能显示比较好的暗态,从而有很好的对比度,并且对比度与入射光波长、液晶的双折射、液晶层的厚度无关。由于只有数值大的介电常数与电场 E 平行才能使液晶材料能量状态最低^[2],因此对应开态即加上垂直于液晶盒的电场 E 时[如图 1(b)所示],负性液晶分子将会垂直于电场取向,即液晶分子平行于两取向层排列。又因为上下基板上 PI 的摩擦方向是相互垂直的,所以基板附近的液晶分子会由于表面锚泊作用而各自平行于相邻基板摩擦方向,由液晶分子间的相互作用和连续体理论可知,此时整个液晶盒里的液晶分子将呈 90° 扭曲。

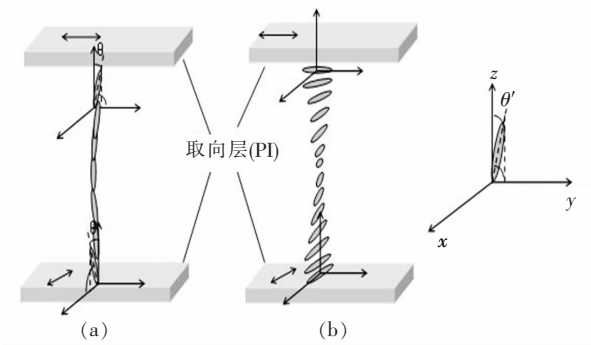


图 1 ITN 显示模式示意图和坐标系. (a) 不加电场; (b) 加电场.

Fig. 1 Schematic diagram of ITN-Cell and coordinate system. (a) without electric field; (b) with electric field.

取向层可以被看成在高低起伏的沟槽上长着的草,如图 2 所示,十八三乙氧基硅烷 (Octade-

cyltriethoxy silane molecules)就类似于这种草,当沟槽通过摩擦或其他方法在基板上形成时,硅烷分子就连接在基板上。这种硅烷分子的长链结构类似于丝状,可以让液晶分子在不加外电场 E 时垂直于沟槽表面分布。因此当加上外场 E 后,液晶分子不再垂直取向而发生倾斜,电场 E 将会使这种负性液晶分子平行躺在垂直取向层上的沟槽内。

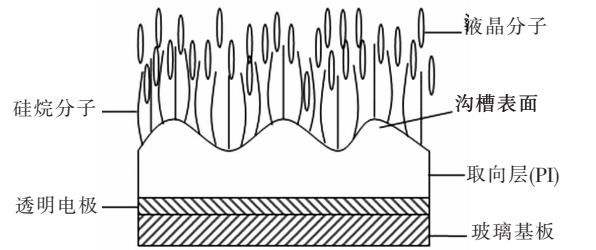


图 2 ITN-Cell 基板结构示意图
Fig. 2 Structure of the ITN-Cell substrate

由于两基板表面取向层都是垂直取向的,所以在加外电场时两取向层之间的液晶分子会倒下,但是在基板附近的液晶分子由于强锚泊作用是立着的。在这种模式下,中间部分液晶分子的指向矢将会在两取向层之间产生扭曲,并将趋向平行两基板排列。这种在开态下逐步发生扭曲提供偏振旋转与传统的扭曲向列相液晶盒在开态下相类似,即在不加电场时,光线将不会受偏振影响而穿过液晶分子。但是,在加上电场时,光线将会沿着指向矢传播。所以,在液晶盒外侧加上两个正交偏振片,不加电场时液晶盒呈暗态,加上电场后液晶盒呈亮态^[6]。

2.2 液晶波导全漏导模

平面光波导几何结构是由两块各向同性的电介质平板组成,其外侧是由完全透明的各向同性半无限电介质包裹。这种结构在与纸面垂直的平面上,也就是 $y-z$ 平面上是没有变化的,如图 3 所

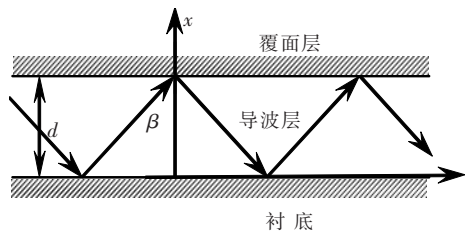


图 3 平板光波导几何结构
Fig. 3 Geometry of planar optical waveguide

示。其主要由 3 部分组成:覆面层(折射率为 n_c)、导波层(折射率为 n_g)、衬底(折射率为 n_s)。要求 $n_g > n_s$, 且 $n_g > n_c$, 为了进一步讨论, 我们假设 $n_s > n_c$, 因此有 $n_g > n_s > n_c$ 。

平面光波在平板波导中的传播如图 3 所示, 入射角为 β 。根据折射定律可知在上下交界处的全反射临界角可表示为 $\beta_c = \sin^{-1}(n_c/n_g)$ 和 $\beta_s = \sin^{-1}(n_s/n_g)$, 其中 $\beta_s > \beta_c$ 。图 4 所示为不同入射角度 β 对应的 3 种不同的波导模式。

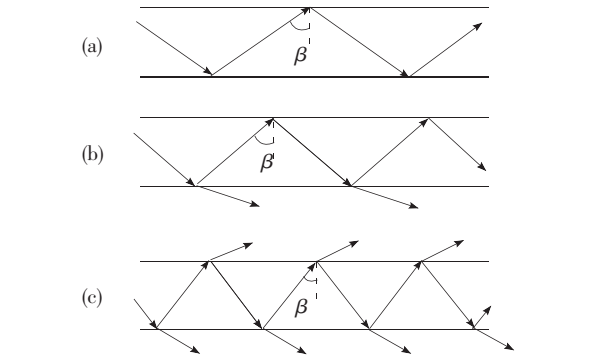


图 4 平面波导 3 种模式. (a) 当 $\beta_s < \beta < \pi/2$ 时为全导模式; (b) 当 $\beta_c < \beta < \beta_s$ 时为半漏波导模式; (c) $\beta < \beta_c$ 时为全漏波导模式.

Fig. 4 Three guided modes in a planar waveguide: (a) $\beta_s < \beta < \pi/2$ full guided mode; (b) $\beta_c < \beta < \beta_s$ half-leaky guided mode; (c) $\beta < \beta_c$ fully-leaky guided mode.

由于液晶具有光学各向异性, 一般情况下波导本征模式将不再是纯粹的 TE(s 光)或 TM(p 光)波^[7]。线偏振光(p 光或 s 光)入射, 反射光和透射光中将出现偏振保存(R_{pp} 、 R_{ss} 、 T_{pp} 、 T_{ss})和偏振转换成分(R_{ps} 、 R_{sp} 、 T_{ps} 、 T_{sp})。当液晶分子沿不

同的方向取向时, 两种成分将会随之改变, 因此能够反映液晶指向矢的变化。光入射到棱镜的角度 β (外角)和入射到液晶盒的角度 α (内角)之间的关系如图 5 所示, 由折射定律^[8-9]可以得出:

$$\alpha = \varphi - \arcsin\left(\frac{n_0 \sin \beta}{n}\right)$$

(1)

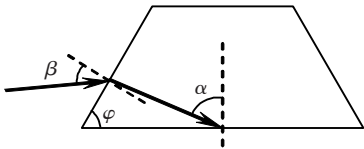


图 5 外角和内角关系示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the relation between external and internal angle

其中 φ 是棱镜的底角(实验中为 60°), n_0 为空气折射率, n 为棱镜折射率。实验给出的正是光通过液晶全漏导模透射率随内角的变化情况。本实验中设定入射外角在 $-10^\circ \sim 10^\circ$, 对应内角变化范围 $56.7^\circ \sim 65.8^\circ$ 。

3 实 验

3.1 实验装置

实验装置如图 6 所示。实验中用到的主要实验设备包括: He-Ne 激光器, 透光孔(2 个), 偏振片(4 个), $1/4$ 波片, 斩波器, 衰减器(2 个), $\theta-2\theta$ 转台, 探测器(3 个), 锁相放大器(3 个), 控制转台以及棱镜耦合系统等。

实验中应用棱镜耦合系统研究液晶波导, 如图所示。棱镜耦合器在导波光学实验中常用于实现光束-薄膜波导的耦合, 它的结构如图 7 所示, 用夹具将两个棱镜夹在一起, 两棱镜底面涂上棱

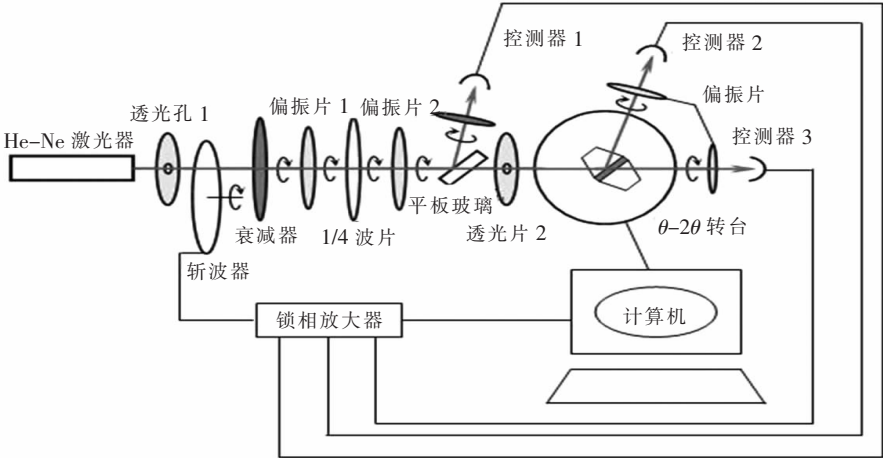


图 6 实验装置图

Fig. 6 Schematic of the experimental installation

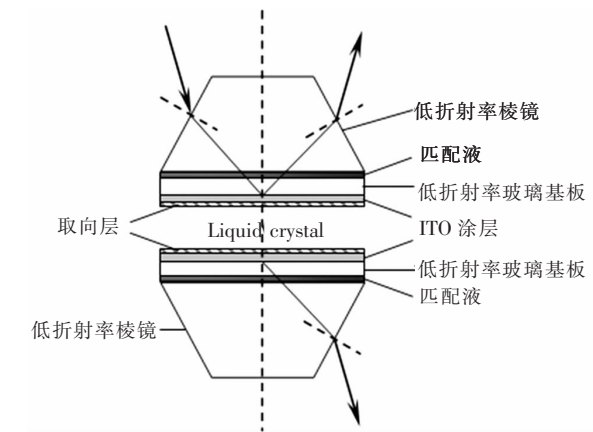


图 7 棱镜耦合系统
Fig.7 Prism coupling system

镜匹配液,匹配液的折射率与上下棱镜折射率相同($n=1.52$),中间夹一个液晶盒,构成棱镜-液晶波导耦合系统。光先后经过偏振片 1、1/4 波片和偏振片 2 得到具有一定偏振状态的线偏振光。当其以一定角度(外角)入射到棱镜耦合系统时,折射进入到上棱镜,由于透明导电氧化锡(ITO)膜和取向层聚酰亚胺(PI)膜是很薄的(纳米级),光直线进入到液晶层,此时将会有偏振转换和偏振保存两种信号产生。又由于液晶层厚度(微米级)相对玻璃基板(毫米级)也是很薄的,透射光经棱镜耦合直线射出,反射光经棱镜耦合沿等同于入射角的方向射出,这种规律与液晶分子取不同取向时(施加不同电压)无关。因此当入射角改变

θ 时,反射光改变 2θ ,对反射光的探测需要 $\theta-2\theta$ 装置。实验在室温条件下进行,并且只对反射光信号进行了测试。

3.2 实验步骤

实验流程图如图 8 所示,具体实验条件和过程可参考文献[10-13]。在实验过程中,为保障实验的稳定性和准确性,需要注意:

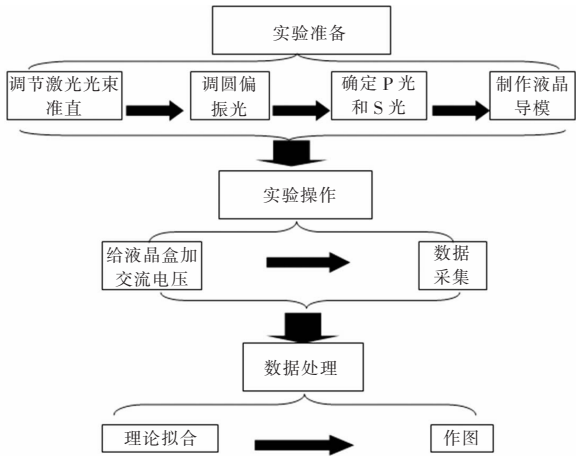


图 8 实验流程图
Fig.8 Experimental flow diagram

(1)经过大量实验测量发现,光源的稳定性对实验结果的精确度影响很大,所以实验中为尽量减小光源不稳定性对实验曲线测量的影响,在原来一级稳压电源(UPS)的基础上加上了二级的稳压电源(三科牌 SKJ 系列智能型交流净化稳压电

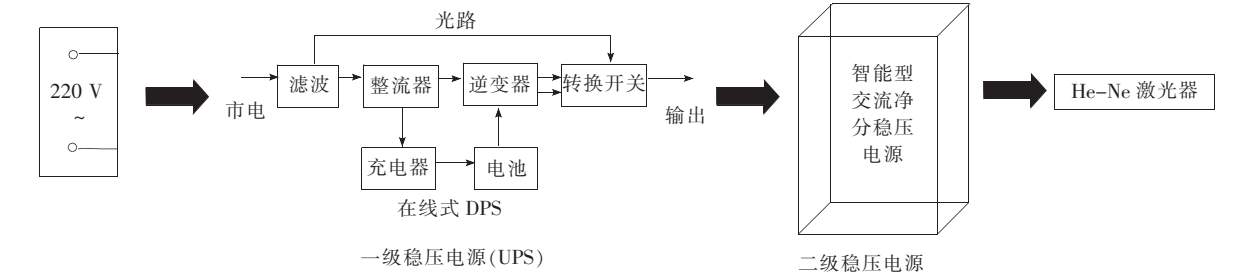


图 9 稳压装置示意图
Fig.9 Schematic of voltage stabilizing device

源)来稳定激光器的输出功率,如图 9 所示。
(2)为了确保实验测量数据之间的可比性,例如同种模式下不同电压的导波图之间的对比,实验中尽量在同一模式时不改变锁相放大器测量量程的前提下进行。

4 结果及分析

4.1 样品制作

为了获得较好的实验效果,实验中使用的空盒是在河北省石家庄冀雅电子有限公司定做,盒

厚约为 4.5 μm ;取向层 PI 上下基板垂直摩擦;电极材料为 ITO。所灌注的负性液晶 MS-N01300-000 是由河北迈尔斯通电子材料有限公司提供。该盒的盒厚、取向层等参数与迈尔斯通负性液晶 MS-N01300-000 匹配很好。向空盒中灌注液晶后,裸眼观察和在偏光显微镜下观察均无可见缺陷,可以推断该样品取向良好且无较大缺陷。

4.2 静态导波实验

实验中只对反扭曲向列相液晶盒样品的反射光强进行了比较详细的测试,其中包括电光特性曲线(V - T 曲线)测试和 4 种模式(R_{pp} 、 R_{ps} 、 R_{sp} 、 R_{ss})不同电压下的反射率曲线测试。

反扭曲向列相液晶盒的电光特性测试曲线如图 10 所示,可以得出其阈值电压大约为 3.13 V_{rms} ,当驱动电压为 8 V_{rms} 左右时达到饱和状态,透过率为 1.0。由多层光学理论和液晶连续体理论可以推导出 ITN 液晶盒的阈值电压公式(2)^[6]。

$$V_{\text{th}} = \pi \sqrt{\left[1 - 4 \left(\frac{K_{22}}{K_{33}}\right)^2 \left(\frac{d}{P_0}\right)^2\right] \frac{K_{33}}{\epsilon_0 |\Delta\epsilon|}} \quad (2)$$

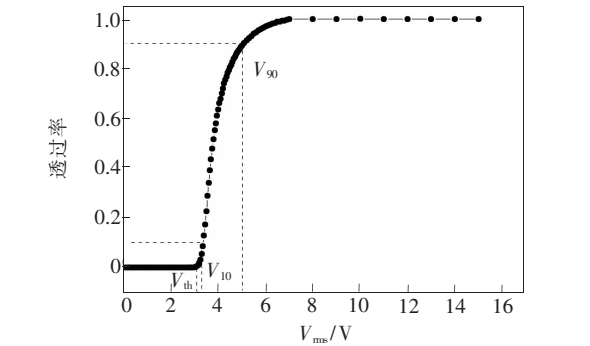


图 10 反扭曲向列相液晶盒电光特性曲线
Fig. 10 V - T curve of ITN-Cell

将厂家提供和测量即得参数代入公式,可求出 K_{22} 并作为本实验的参考值。其中 $V_{\text{th}} = 3.13 \text{ V}$, $K_{33} = 17.0 \text{ PN}$, $\Delta\epsilon = -1.79$, $\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12} \text{ C}^2 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ 和 $d/P_0 = 0.25$ 代入方程(2)可求出 $K_{22} = 9.31 \text{ PN}$ 。

实验测试中分别对 ITN-Cell 施加了 0~7 V 等不同电压,测量 R_{pp} 、 R_{ps} 、 R_{sp} 和 R_{ss} 随光束入射内角变化的反射率,得到了与计算机理论模拟曲线相吻合的各个反射率曲线。在拟合过程中,参考所知参数,以及计算得出的 K_{22} 的近似值,并且参考大量相关文献资料,使各参数调节范围保持在合理范围内。通过充分把握参数对

理论曲线影响的规律,并且反复尝试后得到使理论曲线与实验曲线最接近的参数值,最后得到比较理想的参数,如表 1 所示。在此基础上可以绘制出液晶盒内液晶指向矢倾角和扭曲角的分布图,如图 11 所示,部分实验和理论拟合结果如图 12 所示。

表 1 反扭曲向列相液晶盒实验测量参数

Table 1 Experimental parameters of ITN-Cell

液晶参数		液晶盒参数	
$\epsilon_{//}$	3.27	盒厚	4.50 μm
$\epsilon_{\perp}$	5.06		
$\Delta\epsilon$	-1.79	ITO	41.5 nm 3.10+i0.011
K_{11}	26.5 PN	PI	84.5 nm 2.10+i0.010
K_{22}	9.81 PN	测试温度	25 $^{\circ}\text{C}$
K_{33}	17.0 PN	V_{th}	3.13 V_{rms}
n_e	1.574 8	V_{10}	3.461 V_{rms}
n_o	1.484 8	V_{90}	5.106 V_{rms}
$\Delta n = n_e - n_o$	0.09	摩擦方向	45 $^{\circ}$ /135 $^{\circ}$

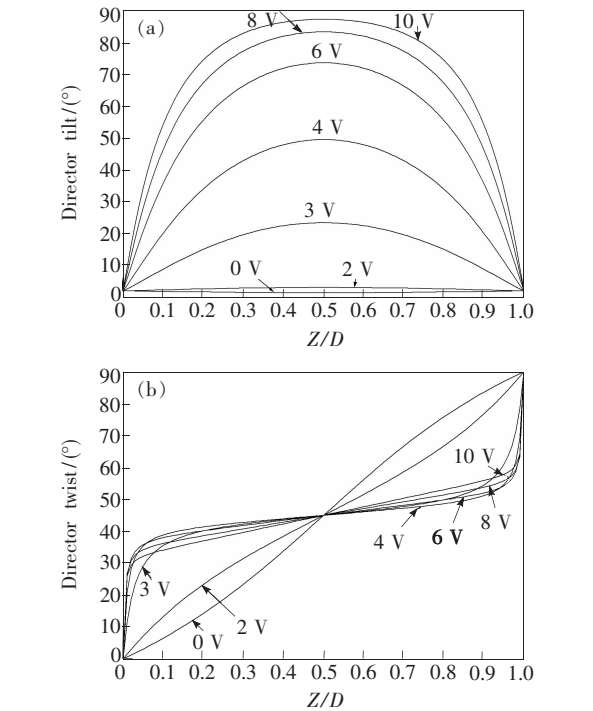


图 11 不同驱动电压下液晶指向矢分布
Fig. 11 Distribution of director with different voltages

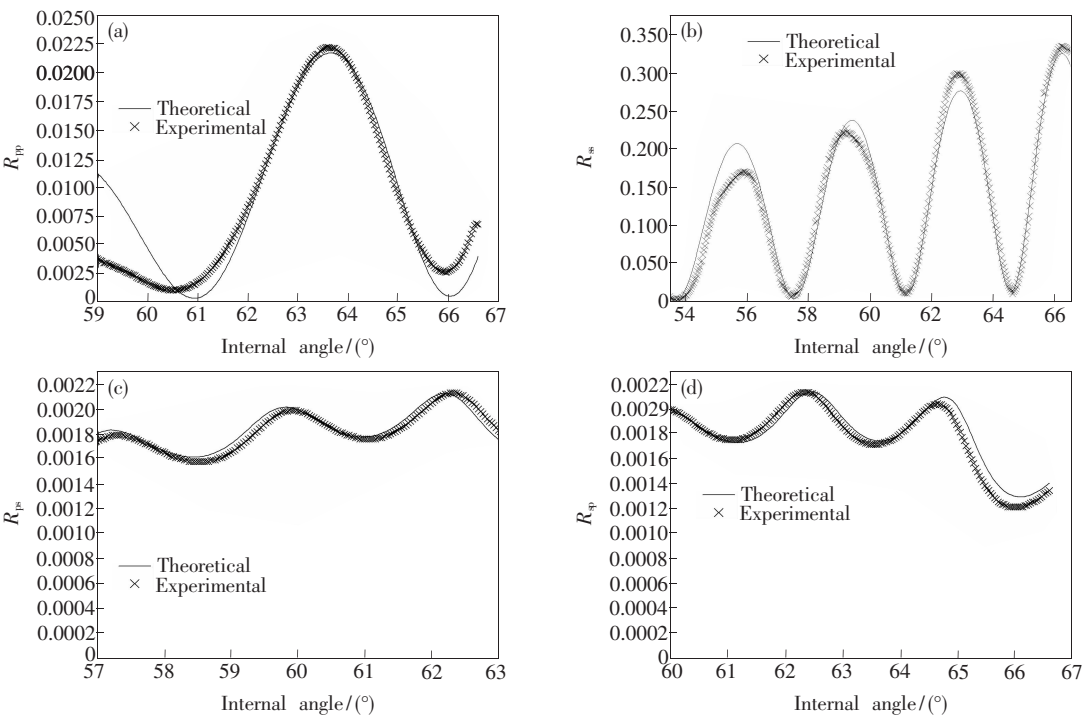


图 12 外加 3V_{rms} (1 kHz) 电压下反扭曲向列相液晶盒实验和理论拟合曲线。(a)(b) 为偏振保存信号 R_{pp} 和 R_{ss} ; (c)(d) 为偏振转换信号 R_{sp} 和 R_{ps} 。

Fig. 12 Comparison of experimental data with theoretical curve of ITN-Cell with an external voltage 3V_{rms} (1 kHz). (a) and (b) for the polarisation-conserving signals, R_{pp} and R_{ss} ; (c) and (d) for the polarisation-conversion signals, R_{sp} and R_{ps} .

5 结 论

利用光学导波的实验方法对反扭曲向列相液晶盒进行了研究,通过大量的实验测量和实验结果规律总结,在验证实验方法可行性和准确性的基础上,对灌注负性向列相液晶(MILESTONE 提供)的反扭曲盒(河北冀雅电子有限公司提供)进行了详细的导波实验测量和研究,通过光学导波实验和理论模拟相结合,精确测量得到所用负性液晶及反扭曲排列液晶盒的多项参数,并利用这些测得的参数模拟出了盒中液晶分子指向矢分布的详细信息。

另一方面,在理论模拟时,为提高实验模拟的精确度和避免在计算模拟中出现较大的理论偏离

实际的情况,实验中首先应用了液晶和液晶盒的某些典型和参数值,很好地提高了拟合的精度。然后通过大量的实验和对理论拟合程序的解读,充分掌握了各项参数对理论模拟曲线的影响方向和程度,以达到理论曲线和实验曲线吻合的完美曲线,进而得出较为精确的参数测量值。

通过与其他手段既得的参数进行对比,得到液晶和液晶盒中比较敏感的参数,其中包括液晶层、PI 取向层、ITO 薄膜的光学各向异性实部和虚部等重要数据,最终达到目前其他液晶器件参数测量方法无法获得的更加全面的参数数据。

致谢: 实验中得到了杨傅子教授的大力支持和帮助,在此表示由衷的感谢!

参 考 文 献:

[1] 王新久. 液晶光学和液晶显示 [M]. 北京: 科学出版社, 2006:3-30.
[2] 谢毓章. 液晶物理学 [M]. 北京: 科学出版社, 1998:5-13.
[3] Ruan L Z, Yang F Z, Sambles J R. Voltage dependent director of a homeotropic negative liquid crystal cell [J].

Appl. Phys. Lett., 2008, 93(3):031909(1-2).

[4] Yang F Z, Samble J R. *Guided mode studies of liquid crystal layers, Chapter 16 of Nanotechnology and NICE Device* [M]. London,UK: Taloy and Francis Ltd, 2003:271-275.

[5] Lee J H, Ge Z B, Wu S T. 掺有反手性分子、表面摩擦方向 90°的垂面排列液晶盒的电光特性 [J]. 现代显示, 2008, 3(85): 13-16.

[6] Taiju T, Susumu S, Tadashi A. Electrooptical properties of vertically aligned twisted nematic cells with negative dielectric anisotropy [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 1997, 36:3531-3536.

[7] 余守宪. 光信息科学与技术系列丛书: 导波光学物理基础 [M]. 北京: 北方交通大学出版社, 2002:1-3.

[8] 姚启钧. 光学教程 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2002:41-45.

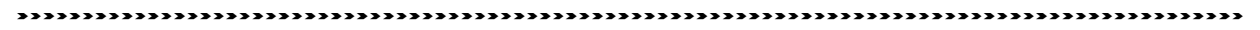
[9] 游璞,于国萍. 光学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2003:23-42.

[10] 叶文江, 李志广, 王欣, 等. 液晶全漏导模的实验研究 [J]. 物理实验, 2010, 30(7): 5-8.

[11] 叶文江, 王欣, 李志广, 等. 用光导波法确定扭曲向列相液晶盒指向矢剖面 [J]. 液晶与显示, 2011, 26(1): 53-58.

[12] 李志广, 叶文江, 郭婷婷, 等. 平行排列向列相液晶的导波研究 [J]. 液晶与显示, 2009, 24(6):818-822.

[13] 武乃福, 邢红玉, 叶文江, 等. 液晶全漏导模透射率的实验研究 [J]. 大学物理实验, 2011, 24(4):1-4.



欢迎订阅 2012 年《液晶与显示》

《液晶与显示》是中国最早创办的液晶学科专业期刊,也是中国液晶学科和显示技术领域中的唯一的综合性专业学术期刊。它由中国科学院长春光学精密机械与物理研究所、中国物理学会液晶分会和中国光学光电子行业协会液晶分会主办,科学出版社出版。

《液晶与显示》以创新性、综合性、实用性为办刊特色,内容丰富,涵盖面广,信息量大,可读性强,既是启迪科技人员开拓创新思路的参考期刊,又是从事液晶和显示技术研究与开发的广大科技人员、大专院校师生及相关领域的科技工作者进行学术交流的论坛,也是图书、情报等部门必不可少的信息来源。

《液晶与显示》为双月刊,国内定价 40.00 元,全年 240.00 元,国内外公开发行。国内邮发代号:12—203,国内读者可在当地邮局订阅;也可通过“全国非邮发报刊联合发行部”订阅(地址:天津市大寺泉集北里别墅 17 号,邮编 300385),本刊的代号为:5074。国外读者可通过中国国际图书贸易总公司订阅(地址:北京 399 信箱,邮编:100044),国外发行代号:4868BM。同时,《液晶与显示》编辑部将竭诚为广大读者服务,随时办理订阅。

地 址:长春市东南湖大路 3888 号 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所	
《液晶与显示》编辑部	邮 编:130033
电 话:0431-86176059 0431-84613406	传 真:0431-84627061
E-mail: yjxs@ciomp. ac. cn; yjyxs@126. com	http://www. yjyxs. com