

一种液晶透镜盒间隙的测试方法*

唐先柱^{1)2)†} 钟德镇²⁾ 简廷宪²⁾ 陆建钢¹⁾ 谢汉萍¹⁾³⁾

1) (上海交通大学, TFT-LCD 关键材料及技术国家工程实验室, 上海 200240)

2) (昆山龙腾光电有限公司, 昆山 215301)

3) (国立交通大学, 台湾)

(2013年3月28日收到; 2013年5月17日收到修改稿)

针对当前液晶透镜盒间隙测试存在的难题, 文中提出采用线偏振干涉法测试方法, 采用光强均匀分布的单色光入射, 检偏器的偏光轴方向与起偏器的偏光轴垂直或者平行, 液晶透镜的液晶取向层的摩擦方向与起偏器偏振轴夹角为 45° , 此时干涉条纹亮暗差别最明显. 利用液晶透镜中心保持预倾角不变的透过率以及其他位置透过率最大值来计算液晶透镜的盒间隙, 该方法简单、可靠, 因采用光学手段测试, 其精确度相对较高.

关键词: 液晶透镜, 盒间隙, 线偏振光干涉, 透过率

PACS: 42.79.Kr, 61.30.Gd, 78.15.+e, 83.80.Xz

DOI: 10.7498/aps.62.174210

1 引言

电影《阿凡达》放映掀起了三维立体显示 (three dimensional display, 3D)^[1] 的研究的热潮, 以 2009 年美国 CES 展上各大品牌的 3D 电视样机不约而同集体亮相为标志, 第三次 3D 技术发展高峰到来了. 同时液晶透镜的研究再次备受青睐, 主要是因为液晶透镜技术的出现使得对透镜的可调可控成为可能, 进而为在裸眼显示中实现 2D/3D 可切换显示、指向性显示等技术难题提供了解决方案. 液晶透镜技术能够通过电场控制液晶分子的动作来实现透镜效果, 既能克服其他裸眼立体显示技术中的亮度低、透镜焦距固定等问题, 又能实现在显示屏幕中 2D/3D 图像的切换显示. 如果该技术能够大规模地应用于终端显示设备, 则必将给 3D 行业带来巨大变革.

液晶透镜的研究始于上世纪 70 年代, 由几个研究小组^[2,3] 提出了用向列相 (Nematic LC) 液晶^[4-8] 研制可调液晶透镜, 最早公开报道成功制得该类器件的时间是在 1979 年, 分别由 Berreman 和

Sato 实现, 当前大多数技术研发大多围绕电极和电压之间的技术关联性来开展^[4-9].

当前液晶材料的光学各向异性 Δn 较小, 满足裸眼 3D 显示需求制备的液晶层透镜需要较大的盒间隙, 一般都在几十微米, 目前液晶盒间隙测量设备一般主要是测量液晶显示器的盒间隙, 一般在 $3-5 \mu\text{m}$, 因此当前这种测试设备不能满足几十微米盒间隙的液晶透镜测试的需求^[9-11].

本文针对当前液晶透镜盒间隙较大, 测试困难, 提出一种液晶透镜盒间隙的线偏光干涉测试方法.

2 液晶透镜的结构与工作原理

此处涉及的是液晶层式透镜, 主要结构如图 1, 此处为液晶透镜的截面示意图, 上面一层玻璃基板和下面一层玻璃基板, 中间夹着液晶层, 在上面的玻璃基板下面和下玻璃基板的上面都有一层是带一定图案 (此处采用上电极为整面电极, 下电极为电极条) 的透明电极, 透明电极上印刷起取向作用的取向层 (图中略去), 摩擦方向垂直于纸面且上下

* 江苏省省科技支撑计划 (批准号: BE2012862)、国家自然科学基金 (批准号: 60906039) 和上海自然科学基金 (批准号: 09ZR1414800) 资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: txzciomp@163.com

基板摩擦方向相反,即摩擦方向平行于液晶透镜电极条.偏振方向与光的传播方向如图所示,由于液晶透镜具有偏振依赖性,要求液晶分子的光轴与偏振平面共面,预倾角的大小与取向层有关.

其工作原理:通过施加电场改变液晶分子的排列方向,使对应的非寻常光的折射率 n_e 连续变化到寻常光的折射率 n_o ,通过电压控制盒内液晶分子的

取向,改变折射率,相应地也就调节了焦距,达到实现透镜功能的目的.

图 1(a) 和 (b) 分别表示当不施加电压时,此时器件内的液晶分子均匀排列,此时相当于平行平板,无透镜功能;当给器件施加控制电压时,器件内部液晶分子将根据电压控制实现不同程度的偏转,实现透镜的功能.

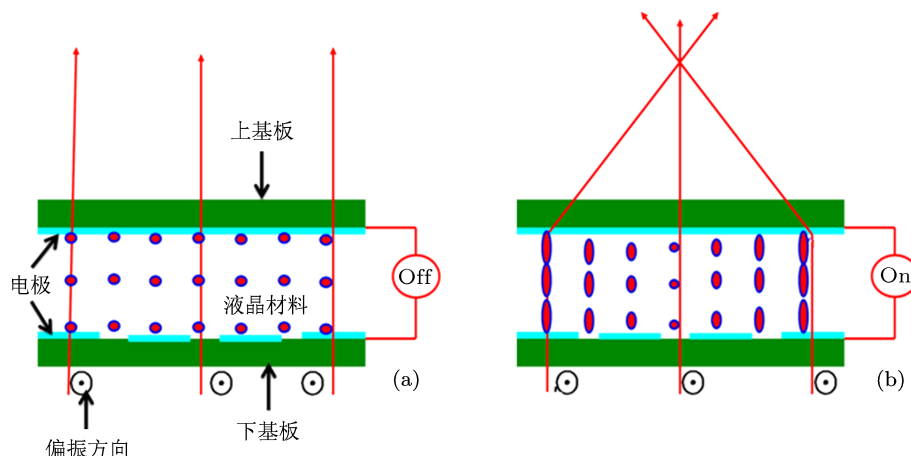


图 1 液晶透镜结构及工作原理示意图

3 线偏光干涉原理

设光的传播方向沿 y 轴方向,偏振平面为 xoy 平面,液晶分子的光轴始终在 xoy 平面内转动,液晶分子光轴与 x 轴的夹角为 θ ,如图 2,向列相液晶可近似看做单轴晶体已经被应用实际生产当中,液晶此时液晶非寻常折射率可表示为

$$\frac{1}{n_{\text{eff}}(\theta)^2} = \frac{\cos^2 \theta}{n_e^2} + \frac{\sin^2 \theta}{n_o^2}, \quad (1)$$

式中 $n_o \leq n_{\text{eff}}(\theta) \leq n_e$, n_e 为 $\theta = 0^\circ$ 时液晶材料的非寻常折射率, n_o 为液晶材料的寻常折射率.

偏振光干涉原理如图 3 所示,一束光强为 I_0 且光强分布均匀的平行单色光经过起偏器(偏振片)后产生的线偏振光 E_1 ,照射到液晶透镜后,其中液晶透镜的摩擦方向沿 y 轴方向,偏振光可分解为 E_{1x} 和 E_{1y} ,其中起偏器偏振轴与被测液晶透镜液晶分子的排列方向呈 β 角,由于液晶对 E_{1x} 和 E_{1y} 的折射率不同,所以经过液晶层后 E_{1x} 和 E_{1y} 将产生相对位相延迟,分别记为 E_{2x} 和 E_{2y} , E_{2x} 和 E_{2y} 再经过检偏器后在检偏器偏光轴方向的透过的分量满足相干条件,产生干涉,干涉后的光强为 I ,其中检偏器的偏光轴方向与起偏器的偏光轴垂直或者平

行,单色光波长为 λ ,液晶透镜的盒间隙为 d .

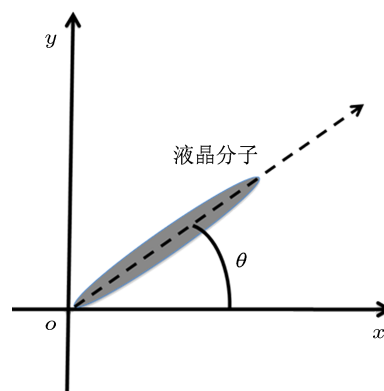


图 2 偏振平面内液晶分子示意图

将检偏器经透镜组成像在 CCD 上,当液晶透镜内部不同位置液晶分子倾斜角 θ 不同时,经过液晶层后 E_{1x} 和 E_{1y} 将产生相对位相延迟不同,会产生不同的 E_{2x} 和 E_{2y} , E_{2x} 和 E_{2y} 再经过检偏器后在检偏器偏光轴方向的透过的分量相干涉,此时在 CCD 上会监测到干涉条纹.

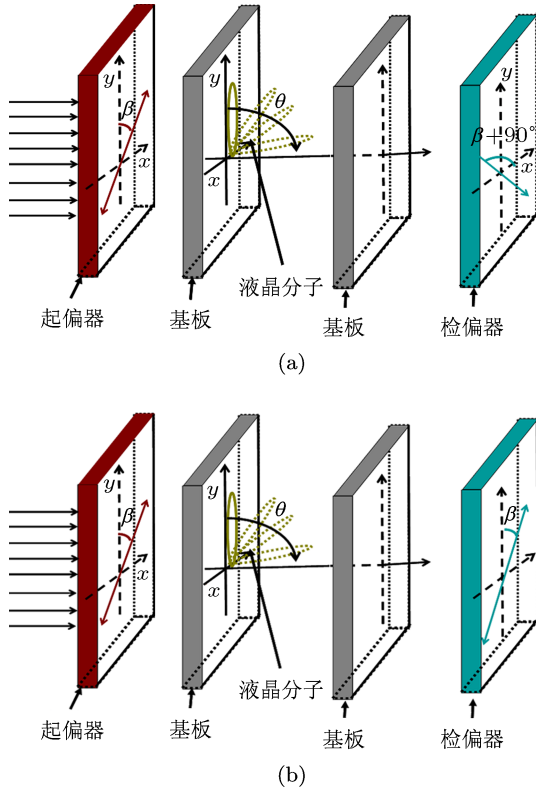


图3 线偏振光干涉基本原理示意图 (a) 检偏器与起偏器偏振轴互相垂直示意图; (b) 检偏器与起偏器偏振轴互相平行示意图

当检偏器与起偏器偏振轴互相垂直时, 通过检偏器后的透过率可表示为

$$T = \frac{I}{I_0} = \frac{\sin^2(2\beta) \sin^2\left(\frac{\pi\Delta nd}{\lambda}\right)}{2}, \quad (2)$$

式中 $\Delta n = n_{\text{eff}}(\theta) - n_0$, 当 $\beta = 45^\circ$ 时, 干涉条纹明暗条纹透过率相差最大, (2) 式可表示为

$$T = \frac{I}{I_0} = \frac{\sin^2\left(\frac{\pi\Delta nd}{\lambda}\right)}{2}. \quad (3)$$

同理, 当检偏器与起偏器偏振轴互相平行时, 通过检偏器后透过率可表示为

$$T = \frac{I}{I_0} = \frac{1 - \sin^2(2\beta) \sin^2\left(\frac{\pi\Delta nd}{\lambda}\right)}{2}. \quad (4)$$

式中 $\Delta n = n_{\text{eff}}(\theta) - n_0$, 当 $\beta = 45^\circ$ 时, (4) 式可表示为

$$T = \frac{I}{I_0} = \frac{1 - \sin^2\left(\frac{\pi\Delta nd}{\lambda}\right)}{2}. \quad (5)$$

4 液晶透镜盒间隙测试原理

检偏器与起偏器偏振轴互相垂直或平行原理一致, 此处仅以检偏器与起偏器偏振轴互相垂直时

来说明测试原理, 具体的操作方法, 令液晶透镜中心的局部区域上下基板电极电压差为零, 该区域关于中心对称, 目的是保持中间部分液晶分子的平均倾斜角等于预倾角 θ_{pr} , 此区域的透过率为 T_c , 该区域两侧部分, 由内到液晶透镜的边缘, 上下基板电压差依次递增, 左右两侧电极电压分布关于中心对称, 施加的电压要保证液晶透镜的干涉条纹两个或者两个以上的最大值波峰, 利用该波峰处的亮度值与中心区域的亮度值之比, 即可得到最大透过率与中心区域的透过率之比. 当由内到液晶透镜的边缘, 上下基板电压差依次递增时对应的液晶分子的倾斜角 θ 由内到透镜边缘逐渐变大, 不同的 θ 会产生不同 $n_{\text{eff}}(\theta)$, 因此不同位置透过率不同, 此时经过检偏器后会产生干涉条纹, 图 4 举例说明一个周期内干涉条纹透过率分布的情况.

光强为 I_0 的光通过该装置后, 干涉条纹最大值亮度透过率 $T_{\text{max}} = 50\%$, 由 (2) 式可知中心区域透过率 T_c 与干涉条纹最大值亮度透过率的比值可表示为

$$\begin{aligned} \frac{T_c}{T_{\text{max}}} &= \sin^2\left(\frac{\pi\Delta nd}{\lambda}\right) \\ &= \sin^2\left(\frac{\pi(n_{\text{eff}}(\theta_{\text{pr}}) - n_0)d}{\lambda}\right). \end{aligned} \quad (6)$$

当中间区域干涉条纹与相邻最亮条纹之间有最暗条纹时, 即中间区域干涉条纹亮度和相邻最亮波峰之间有波谷时, 由 (6) 式推导出 d 的表达式为

$$d = \left(n + \frac{\arcsin(\sqrt{2T_c})}{\pi}\right) \lambda / (n_{\text{eff}}(\theta_{\text{pr}}) - n_0). \quad (7)$$

当中间区域干涉条纹与相邻最亮条纹之间无最暗条纹时, 即中间区域干涉条纹亮度和相邻最亮波峰之间无波谷时, 由 (6) 式推导出 d 的表达式为

$$d = \left(n - \frac{\arcsin(\sqrt{2T_c})}{\pi}\right) \lambda / (n_{\text{eff}}(\theta_{\text{pr}}) - n_0). \quad (8)$$

设液晶透镜采用的隔垫物直径为 Φ , 厂商给出制备器件时一般压缩量百分比为 a , 压缩后的盒间隙的误差百分比为 $\pm b$, 液晶透镜盒间隙的范围为 $\Phi(1-a-b) \leq d \leq \Phi(1-a+b)$.

当中间区域干涉条纹与相邻最亮条纹之间有最暗条纹时, 由液晶透镜间隙所设定的范围, 推导出

$$\begin{aligned} \Phi(1-a-b) \frac{(n_{\text{eff}}(\theta_{\text{pr}}) - n_0)}{\lambda} - \frac{\arcsin(\sqrt{2T_c})}{\pi} &\leq n \\ &\leq \Phi(1-a+b) \frac{(n_{\text{eff}}(\theta_{\text{pr}}) - n_0)}{\lambda} - \frac{\arcsin(\sqrt{2T_c})}{\pi}. \end{aligned} \quad (9)$$

同理, 当中间区域干涉条纹与相邻最亮条纹之间无最暗条纹时, 由液晶透镜间隙所设定的范围, 推导出

$$\Phi(1-a-b)\frac{(n_{\text{eff}}(\theta_{\text{pr}})-n_o)}{\lambda} + \frac{\arcsin(\sqrt{2T_c})}{\pi} \leq n \leq \Phi(1-a+b)\frac{(n_{\text{eff}}(\theta_{\text{pr}})-n_o)}{\lambda} + \frac{\arcsin(\sqrt{2T_c})}{\pi}. \quad (10)$$

求出符合条件的 n 的取值, 即可得到液晶透镜的盒间隙, b 值的选取应当使 $\Phi 2b$ 误差范围引起的位相变化量要小于一个周期, 即满足

$$\frac{2(n_{\text{eff}}(\theta_{\text{pr}})-n_o)\Phi b}{\lambda} < 1. \quad (11)$$

以图 4 为例说明根据干涉条纹计算液晶透镜盒间隙的过程, $T_c = 25\%$, 例如测试光波长为 $\lambda = 550 \text{ nm}$, 预倾角为 2° , $n_e = 1.72$, $n_o = 1.511$, 则

$$n_{\text{eff}}(\theta_{\text{pr}}) - n_o = n_{\text{eff}}(2^\circ) - n_o = 1.71969 - 1.511 = 0.20869.$$

经计算 $b\%$ 的值取 6% , 设隔垫物直径为 $\Phi = 15 \mu\text{m}$, 假设制备器件时隔垫物压缩量百分比为 8% , 压缩后的盒间隙的误差为 $\pm 6\%$, 液晶透镜盒间隙的范围为 $15(1\% - 14\%) \leq d \leq 15(1\% - 2\%)$, 即 $12.9 \mu\text{m} \leq d \leq 14.7 \mu\text{m}$.

代入 (9) 式可得 $4.64473 \leq n \leq 5.32771$, 所以 $n = 5$, $d = (5 + 1/4) \times 0.00055 / 0.20869 \approx 13.6 \mu\text{m}$.

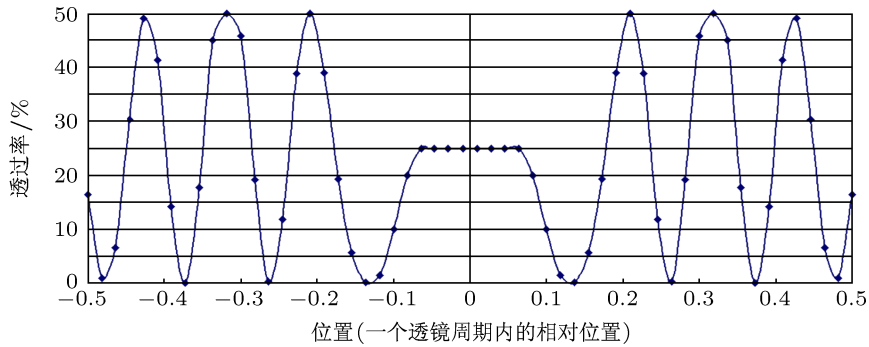


图 4 液晶透镜干涉条纹透射率分布

5 结论

针对当前液晶透镜盒间隙测试存在的难题, 文中提出采用线偏振干涉法测试方法, 采用光强均匀分布的单色光入射, 检偏器的偏光轴方向与起偏器的偏光轴垂直或者平行, 液晶透镜的摩擦方向与起

偏器偏振轴夹角为 45° 时, 干涉条纹亮暗差别最明显. 利用液晶透镜中心保持预倾角不变的透射率以及其他位置透射率分布情况计算液晶透镜的盒间隙, 该方法采用光干涉原理测试, 其简单、可靠、精确度高.

- [1] Wang F, Zhao X, Yong Y, Fang Z L, Yuan X C 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 084212 (in Chinese) [王芳, 赵星, 杨勇, 方志良, 袁小聪 2012 物理学报 **61** 084212]
- [2] Sato S 1979 *Jpn. J. Appl. Phys.* **18** 1679
- [3] Berreman D W 1980 *U.S. Patent* 4190330
- [4] Zheng Z G, Ma J, Song J, Liu Y G, Hu L F, Xuan L 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 15 (in Chinese) [郑致刚, 马骥, 宋静, 刘永刚, 胡立发, 宣丽 2007 物理学报 **56** 15]
- [5] Yang P B, Cao L G, Hu W, Zhu Y Q, Guo Q, Yang X B 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 285 (in Chinese) [杨平保, 曹龙贵, 胡巍, 朱叶青, 郭旗, 杨湘波 2008 物理学报 **57** 285]
- [6] Zheng Z G, Li W C, Liu Y G, Xuan L 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 7344 (in Chinese) [郑致刚, 李文萃, 刘永刚, 宣丽 2008 物理学报 **57** 7344]
- [7] Yin J L, Huang X G, Liu S H, Hu S J 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 5268 (in Chinese) [殷建玲, 黄旭光, 刘颂豪, 胡社军 2006 物理学报 **55** 5268]
- [8] Ding H B, Pang W N, Liu Y B, Shang R C 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 4097 (in Chinese) [丁海兵, 庞文宁, 刘义保, 尚仁成 2005 物理学报 **54** 4097]
- [9] Ren H W, Fan Y H, Gauza S, Wu S T 2004 *Appl. Phys. Lett.* **84** 4789
- [10] Nose T, Masuda S, Sato S 1992 *Jpn. J. Appl. Phys.* **31** 1643
- [11] Ye M, Wang B, Sato S 2004 *AO* **43** 6407

A measurement method of cell gap for liquid crystal lens*

Tang Xian-Zhu^{1)2)†} Chung Te-Chen²⁾ Jen Ting-Hsien²⁾
Lu Jian-Gang¹⁾ Shieh Han-Ping¹⁾³⁾

1) (National Engineering Laboratory of TFT-LCD Materials and Technologies, Displays and Lighting Center, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

2) (Infovision Optoelectronics Co. Ltd., Kunshan 215301, China)

3) (National Chiao Tung University (NCTU), Hsinchu, Taiwan, China)

(Received 28 March 2013; revised manuscript received 17 May 2013)

Abstract

There was a problem in current cell gap measurement of liquid crystal (LC) lens. A method was proposed by adopting interference of linearly polarized light in this paper. It was claimed that the incident light was monochromatic light with a uniform distribution of light intensity. The polarization axis of the analyzer was perpendicular or parallel to the polarization axis of polarizer. The difference between light and dark interference fringes was the biggest when the angle was equal to 45° between the rubbing direction of alignment layer in the LC lens and the polarization axis of polarizer. The cell gap of LC lens can be calculated by the transmittance of LC lens center and the max transmittance of its other locations. The tilt angle was equal to the pre-tilt angle of LC at the LC lens center. This method was simple and reliable. Its accuracy is relatively high due to the use of optical interference principle.

Keywords: liquid crystal lens, cell gap, interference of linear polarized light, transmittance

PACS: 42.79.Kr, 61.30.Gd, 78.15.+e, 83.80.Xz

DOI: 10.7498/aps.62.174210

* Project supported by the Jiangsu Provincial Science and Technology Support Program (Grant No. BE2012862), the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60906039), and the Shanghai Natural Science Foundation, China (Grant No. 09ZR1414800).

† Corresponding author. E-mail: txzciomp@163.com