

文章编号:1007-2780(2016)06-0553-05

聚合物分散液晶透明投影屏幕成像原理研究

裴伶会,王 宇,范志新*

(河北工业大学 理学院,天津 300401)

摘要:对施加电场时呈透明态(ON 态)的聚合物分散液晶(PDLC)膜用作透明投影屏幕的原理给出定性与定量的描述和分析。在 PDLC-ON 态测试样品的透光率随入射角变化曲线,发现 S 偏振光透光率不受 PDLC 膜的影响,P 偏振光透光率随入射角变化受 PDLC 膜的影响衰减严重,发生散射。建立了 P 偏振光透光率随入射角度变化物理模型,给出了 P 偏振光的透光率的表达式。模拟计算得出理论曲线,与实验曲线相符合,进而解释了 PDLC-ON 态作为透明投影屏幕的成像原理。

关 键 词:聚合物分散液晶;透明投影屏幕;成像原理;菲涅耳公式;透光率

中图分类号:O433;O753.2 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/YJYXS20163106.0553

Principle of polymer dispersed liquid crystal transparent projection screen

PEI Ling-hui, WANG Yu, FAN Zhi-xin*

(College of Science, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China)

Abstract: The principle of polymer dispersed liquid crystal film as transparent projection screen on the application of electric field (ON state) is described and analyzed qualitatively and quantitatively. The transmittance curves with incident angle of samples are tested at PDLC-ON state. It shows that the transmittance of S polarized light is not affected by the PDLC film, while the transmittance of P polarized light decreases obviously. The physical model of the change of P polarized light transmittance with the incident angle is established, and the expression of the transmittance of P polarized light is given. The theoretical curve fits well with the experimental curve, which explains the imaging principle of the PDLC ON state as the transparent projection screen.

Key words: polymer dispersed liquid crystal; transparent projection screen; imaging principle; Fresnel formula; transmittance

1 引 言

聚合物分散液晶膜(PDLC 膜)具有散射雾态

外观,施加电场变透明态,因用作高档豪华装修隔断而已经大量商业化。PDLC 的散射态是聚合物包裹的液晶微滴中的液晶分子,没有一致取向,既不能当作各向同性的普通液体,也不能当作各向

异性的单轴晶体,每个液晶微滴都相当于是浑浊液体才造成光散射。在施加垂面电场作用下液晶分子都沿电场方向排列,这时才可以把液晶微滴当作光轴沿电场方向取向的单轴晶体,而沿光轴方向没有双折射效应,液晶的折射率与聚合物折射率匹配,恰如同种光介质,才呈透明状态。在 PDLC 通电透明状态(ON 态)有显著的视角特性,即沿着 PDLC 膜表面法线方向看十分透明,但偏离法线方向看,虽然还很透明,但却带有一定的雾度^[1-11]。这是因为偏离液晶微滴光轴方向就有双折射效应,液晶微滴有等效折射率与聚合物折射率存在微小差异,造成一定的光散射。正是利用到这个视角特性,在 PDLC-ON 态,人们拿它还当作透明投影屏幕。透明投影屏幕使观众隔着屏幕能看到屏幕后面的景物,又能看清楚屏幕上的投影视频图像,具有隔空悬物魔幻成像的神奇效果。一般而言,透明投影屏幕的透光率高,成像效果自然就差;而成像效果亮,透光率就低。通常应用上需要有大流明数高功率投影机,并且环境不要太明亮。虽然 PDLC 电控调光膜作为透明背投影屏幕的应用越来越多,但是关于其成像原理解释却都只限于上述定性的描述文献[1-3]的作者给出了详细而精确的理论与实验研究,还缺少更加深入详细的研究报道。这是技术应用走在前面,理论研究相对滞后的问题^[1-15]。本文从更经典的菲涅耳透光率公式出发^[12],对 PDLC 透明投影屏幕的成像原理给出简单的分析探讨。

2 实 验

实验样品为北京众智同辉公司向客户提供的调光膜小样品,热固化工艺制造的聚合物分散液晶胶片。测试样品随入射光角度变化的透过率曲线,所用仪器是简易液晶电光效应实验仪,测试光路如图 1 所示。水平转动样品,不放置偏振片测得自然光的透光率随入射角变化曲线。水平转动样品的法线与入射光线构成入射面,规定垂直入射面的偏振光为 S 光,平行入射面的偏振光为 P 光,放置偏振片并转动偏振片的透光轴方向分别在竖直方向和水平方向,即得到 S 偏振光和 P 偏振光的透光率随入射光角度变化的曲线。

图 2 是普通透明玻璃样品的自然光、P 光、S 光的透光率随入射光角度变化的曲线,自然光曲

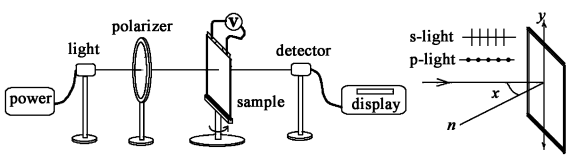


图 1 测试光路
Fig. 1 Test light path

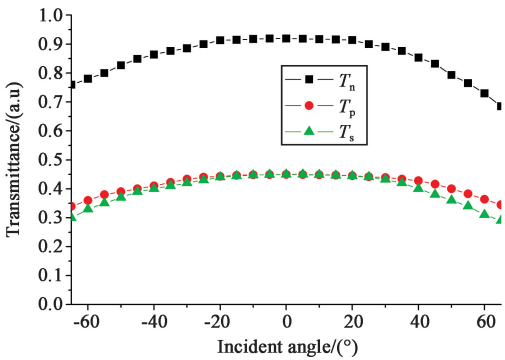


图 2 普通玻璃 T-x 曲线
Fig. 2 Test curve of T-x of the ordinary glass

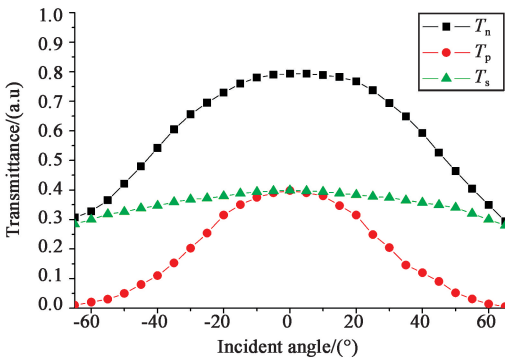


图 3 PDLC-ON 态 T-x 曲线
Fig. 2 Test curve of T-x of the PDLC ON state

线在上,P 光曲线略高于 S 光曲线在中,S 光曲线在下(P 光曲线+S 光曲线=自然光曲线)。图 3 是聚合物分散液晶膜样品 ON 态的自然光、P 光、S 光的透光率随着入射光角度变化的曲线,自然光曲线在上,但却是 S 光曲线在中,P 光曲线在下(P 光曲线+S 光曲线=自然光曲线)。图 3 与图 2 比较可见,S 光透光率曲线基本没有什么变化,而自然光和 P 光的透光率随入射光角度变化的曲线就很不相同。即由图 3 实验曲线可以看到,S 光透光率不受 PDLC 膜影响,也就对散射不起作用,对投影成像没有贡献。而 P 光透光率受 PDLC 膜影响很大,大角度入射时,P 光透光率很

小,散射很严重,对投影成像起决定作用。

3 理 论

研究透明材料透光率的经典理论是菲涅耳公式^[16],但菲涅耳公式只给出了单个界面的透光率表达式,而实际材料总是有两个以上的界面,却并没有“万能的”表达式。在此我们要用菲涅耳公式加上合理的假设,建立合理的模型来进行 PDLC-ON 态透明投影屏幕成像原理的理论分析。在菲涅耳公式中,P 分量和 S 分量的振动是相互独立的。对于聚合物分散液晶样品在通电 ON 态时,S 光分量是同种折射率,透光率与普通透明材料结果相同,没有变化,不发生散射。P 光则有散射,前散射和后散射强度不同,对于投影成像起作用,如图 4 所示($T_{\max}$ 表示垂面观察透光率最大, H 表示侧面观察带雾度)。

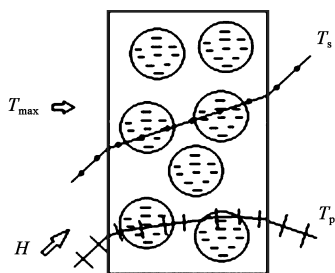


图 4 PDLC-ON 态结构示意图

Fig. 4 A diagram of the PDLC ON state structure diagram

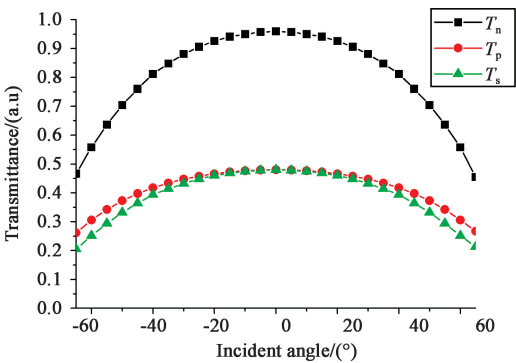


图 5 玻璃单个界面 T-x 理论曲线

Fig. 5 Theoretical curve of T-x of a single glass interface

在考虑自然光是独立偏振光之和的情况下,我们取菲涅耳透光率公式都乘以 1/2 系数,由菲涅耳折射透光率公式得到光束从空气($n_{\text{air}}=1$)进入胶片($n_{\text{polymer}}=1.5$)的透光率,P 光和 S 光的透光率公式:

$$T_p = \frac{1}{2} \frac{n_2}{n_1} \left(\frac{2n_1 \cos i_1}{n_2 \cos i_1 + n_1 \cos i_2} \right)^2,$$
$$T_s = \frac{1}{2} \frac{n_2}{n_1} \left(\frac{2n_1 \cos i_1}{n_1 \cos i_1 + n_2 \cos i_2} \right)^2.$$

由菲涅耳透光率公式计算画图,得到单个界面的透光率曲线,如图 5 所示。实验测试 PDLC-ON 态的透过率,非偏振光结果,对菲涅耳公式计算曲线,考虑空气($n=1$)到胶片($n=1.5$),胶片($n=1.5$)到 ITO($n=2$),ITO($n=2$)到 PDLC($n=1.5$)层,三个界面,另一侧又三个界面,法线入射透光率:

$$T_0 = T_{\text{air-polymer}} T_{\text{polymer-ITO}} T_{\text{ITO-PDLC}} T_{\text{PDLC-ITO}} T_{\text{ITO-polymer}} T_{\text{polymer-air}} = \left[\frac{4n_{\text{air}}n_{\text{polymer}}}{(n_{\text{air}}+n_{\text{polymer}})^2} \right]^2 \left[\frac{4n_{\text{ITO}}n_{\text{polymer}}}{(n_{\text{ITO}}+n_{\text{polymer}})^2} \right]^4 = 84.8\%$$

把菲涅耳公式计算结果,简单乘以 $k=84.8/96=88.33\%$,对整个曲线压缩下调,这里不是推导,是合理简化假设。

液晶微滴中液晶分子垂面排列,法线入射,液晶折射率与聚合物折射率相等都是 1.5,同种介质,光线通过,无反射散射。倾斜入射,P 光在入射面内,与液晶分子长轴方向有投影分量,使光线经过不同介质,发生反射散射,等效折射率计算:

$$\frac{1}{n_{\text{eff}}^2} = \frac{\cos^2 \theta}{n_o^2} + \frac{\sin^2 \theta}{n_e^2}.$$

液晶微滴实际形状不规则,简化为球腔,如图 6 所示,入射光束平均入射角为 45° 。当入射角 45° 时, $\sin 45^\circ = \cos 45^\circ$, 聚合物与液晶微滴界面透光率:

$$T_p = \frac{n_{\text{eff}}}{n_o} \left(\frac{2n_o \cos i_1}{n_{\text{eff}} \cos i_1 + n_o \cos i_2} \right)^2 \approx \frac{n_{\text{eff}}}{n_o} \left(\frac{2n_o \cos i_1}{n_{\text{eff}} \cos i_1 + n_{\text{eff}} \cos i_1} \right)^2 \sim \frac{n_o}{n_{\text{eff}}},$$

即聚合物与液晶界面透光率: $T_p \approx n_o/n_{\text{eff}}$ 。

取聚合物分散液晶层厚度 $20\text{ }\mu\text{m}$,液晶微滴

平均直径 $0.5\text{ }\mu\text{m}$, 聚合物与液晶比例 $1:1$, 单个液晶微滴体积, $V_{\text{lc}}=4\pi r^3/3$, 在直径 $0.5\text{ }\mu\text{m}$ 高 $20\text{ }\mu\text{m}$ 长圆柱体中, 圆柱体体积 V , 含有 m 个液晶微滴,

$$\begin{aligned} V_{\text{polymer+lc}} &= \pi r^2 h, \\ V_{\text{lc}}/V &= (4\pi mr^3)/(3\pi r^2 h) = \\ (4mr)/(3h) &= m/60 = 0.5, m = 30. \end{aligned}$$

大角度入射, 路径更长, 遇到液晶微滴更多, 液晶微滴个数 $m/\cos\theta$ 。得到:

$$T(x) \approx T_0 T^{2m/\cos x} / 2 = 84.8\% \cdot 0.5 \cdot \left[\frac{n_o}{n_{\text{eff}}} \right]^{2m/\cos x}.$$

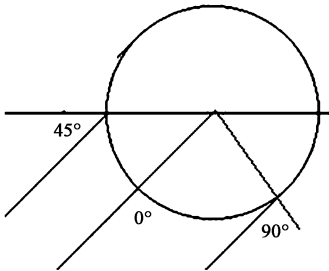


图 6 球面入射平均角度

Fig. 6 Average angle of incidence of spherical surface

用同样的方法计算当液晶微滴的平均直径为 $1\text{ }\mu\text{m}$, $2\text{ }\mu\text{m}$, $4\text{ }\mu\text{m}$ 时的透过率, 如图 7 所示。由图 7 可见, 取液晶与聚合物的比例为 $1:1$, 液晶微滴取不同的直径, 当直径越大时 P 光的透光率越大, 液晶微滴直径较小, 透光率曲线较低, 说明散射越严重, 对投影成像起作用越大。从图 7 理论曲线与图 3 实验曲线对比又可以看到, 如果理论表达

式正确, 则还能根据计算曲线判断出样品中液晶微滴的平均直径在介于 $0.5\sim1\text{ }\mu\text{m}$ 之间。

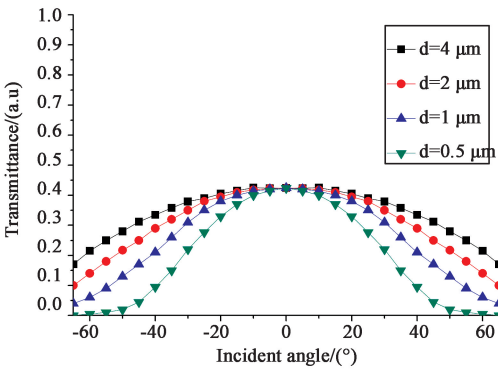


图 7 P 光 PDLC ON 态 T-x 理论曲线

Fig. 7 Theoretical curve of T-x of P light PDLC ON state

4 结 论

聚合物分散液晶膜在施加垂面电场的透明状态, 是很好的透明背投影屏幕技术。定性的成像原理解释是在 PDLC-ON 态有明显的视角特性, 正面观察透光率高, 侧面观察带有雾度。定量测试表明样品的 S 偏振光透光率随入射角度变化曲线不受 PDLC 膜影响, P 偏振光透光率随入射角度变化曲线受 PDLC 膜影响衰减严重。根据本文所建立的 P 偏振光透光率随入射角的变化表达式得到的理论曲线与实验曲线能相符合, 进而对 PDLC-ON 态用作透明背投影屏幕的成像原理给出了定量的理论描述。

参 考 文 献:

[1] CRAWFORD G P, DOANE J W, ZUMER S. *Handbook of Liquid Crystal Research* [M]. New York: Oxford University Press, 1997.

[2] WHITEHEAD J B, ZUMER S, DOANE W. Light transmission and scattering of polymer dispersed liquid crystals [C]. Proceedings of SPIE 1080, Liquid Crystal Chemistry, Physics, and Applications, Los Angeles, CA: SPIE, 1989: 250-257.

[3] DOANE J W, WEST J L, PIRS J, et al. High-intensity color projection for automotive displays [C]. Proceedings of SPIE 958, Automotive Displays and Industrial Illumination, Dearborn, MI: SPIE, 1988: 94-98.

[4] 曾勃. 聚合物分散液晶的制备及电光特性研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2006.

ZENG B. Study on Preparation of polymer dispersed liquid crystal and its electro optical properties [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology, 2006. (in Chinese)

[5] 窦艳丽. 聚合物分散液晶膜的制备与研究[D]. 长春: 吉林大学, 2007.

DOU Y L. Fabrication and research of polymer dispersed liquid crystal films [D]. Changchun: Jilin University, 2007. (in Chinese)

- [6] 王建华. 聚合物分散液晶膜的制备及光学性能的研究[D]. 沈阳:东北大学,2010.
WANG J H. The fabrication and optic-property studying of polymer dispersed liquid crystals films [D]. Shenyang: Northeastern University, 2010. (in Chinese)
- [7] 任洪文,黄锡珉,凌志华,等. 聚合物分散液晶膜中液晶分子的电场取向效应[J]. 液晶与显示,1998,13(1):33-39.
REN H W, HUANG X M, LING Z H, *et al.* Orientation effects of liquid crystal moleculars under electric field in PDLC film [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 1998, 13(1): 33-39. (in Chinese)
- [8] 阎斌,王守康,何杰,等. 聚合物结构对PDLC性能的影响[J]. 液晶与显示,2007,22(2):129-133.
YAN B, WANG S L, HE J, *et al.* Effect of polymer structures on electro-optical properties of polymer dispersed liquid crystals [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2007, 22(2): 129-133. (in Chinese)
- [9] 李永谦,武永鑫,范志新. PDLC膜的光学特性[J]. 现代显示,2009(1):48-50.
LI Y Q, WU Y X, FAN Z X. Optical characters of PDLC films [J]. *Advanced Display*, 2009(1): 48-50. (in Chinese)
- [10] 靳玉亮,纪影,范志新. PDLC膜的电光特性实验[J]. 现代显示,2009(3):51-53.
JIN Y L, JI Y, FAN Z X. Experiment of elector-optical characters of PDLC films [J]. *Advanced Display*, 2009 (3):51-53. (in Chinese)
- [11] 樊芳,解一军,范志新. 聚合物分散液晶膜的制备及电光性能[J]. 高分子材料科学与工程,2015,31(7):87-91.
FAN F, XIE Y J, FAN Z X. Preparation and electro-optical performance of polymer dispersed liquid crystal film [J]. *Polymer Materials Science & Engineering*, 2015, 31(7):87-91. (in Chinese)
- [12] 王楚,汤骏雄. 基础物理教程-光学[M]. 北京:北京大学出版社,2001.
WANG C, TANG J X. *Basic Physics Tutorial Optics* [M]. Peking: Peking University Press, 2001. (in Chinese)

作者简介:范志新(1960—),男,吉林人,博士,教授,主要从事液晶器件物理实验和教学研究。E-mail: zxfan@hebut.edu.cn

裴伶会(1990—),女,河北唐山人,硕士研究生。E-mail: 954942217@qq.com

王宇(1990—),女,河北沧州人,硕士研究生。E-mail: 952576040@qq.com