

文章编号:1007-2780(2015)06-0937-06

剪切液晶散射偏光玻璃的视角特性

丁 兰^{1*}, 裴伶会², 范志新²

(1. 无锡科技职业学院 电子工程学院, 江苏 无锡 214028;

2. 河北工业大学 理学院, 天津 300401)

摘要:制备出应变调光玻璃样品,利用剪切装置对样品施加剪切应力后,样品呈散射偏光态。实验观察到样品所特有的在剪切力施加方向上透光率偏高的视角特性,通过建立理论模型并测试透光率随入射角变化曲线,得到了散射偏光玻璃透光率综合表达式,以及样品中液晶微滴倾斜角度与透光率关系。模拟计算表明,本文所建立的理论表达式能基本描述剪切液晶散射偏光玻璃特性。

关键词:剪切液晶;散射偏光玻璃;透光率;视角特性

中图分类号: O433; O753.2 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/YJYXS20153006.0937

Viewing angle characteristic of sheared liquid crystal scattering polarization glass

DING Lan^{1*}, PEI Ling-hui², FAN Zhi-xin²

(1. School of Electronic Engineering, Wuxi Professional College of Science and Technology, Wuxi 214028, China;

2. College of Science, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China)

Abstract: The sample of stressed switchable glass is prepared. While the sample is being applied on the sheared stress by the sheared device, it is in the scattering polarized state. The peculiar characteristic of visual angle that transmittance of light is higher in the direction of sheared force is observed. Through establishing theoretical model and testing the curve of the light transmittance changing with the incident angle, the comprehensive expression of transmittance of scattering polarization glass and the relationship between the tilt angle of liquid crystal and transmittance of liquid crystal in the sample is obtained. The simulation results show that the theoretical expression can basically describe the sheared liquid crystal scattering polarization glass properties.

Key words: sheared liquid crystal; scattering polarization glass; transmittance; viewing angle characteristic

收稿日期: 2015-06-01; **修订日期:** 2015-06-22.

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 61475042, No. 11274088); 江苏省大学生创新创业训练计划项目 (No. 201412681004Y); 无锡市精品课程

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 61475042; No. 11274088); Jiangsu Province Students' Innovation and Entrepreneurship Training Program; Wuxi City Excellent Curriculum (No. 2014126810045)

* 通信联系人, E-mail: dinglan@wxstc.cn

1 引 言

聚合物分散液晶 (Polymer dispersed liquid crystal)膜具有散射雾态外观,施加电场变透明态,这是电控调光膜技术。对聚合物分散液晶膜制品施加应力(剪切、拉伸或按压),能使制品从散射雾态变半透明态,这又是奇特的应变调光膜技术。由于电控调光膜获得了越来越多的应用,聚合物分散液晶的电光特性已经被人们深入研究过^[1-5]。而应变调光膜还没能得到应用,也不是液晶领域热点研究课题,所以远未被充分认识和探讨^[6-13]。

应变调光玻璃制品在受到剪切力作用下,不仅转变成半透明态,而且在半透明态还具有散射偏光片功能。这种散射偏光玻璃的透光轴在垂直剪切方向,自然光入射,垂直剪切方向的偏振光分量透过,平行剪切方向的偏振光分量散射。散射偏光玻璃的偏光原理是聚合物分散液晶膜中的液晶微滴经剪切发生形变,由球形微滴变成倾斜椭球微滴,液晶分子排列大致沿椭球长轴方向,沿液晶分子取向方向的偏振光,因为液晶折射率 n_e 与聚合物折射率 n_p 不匹配造成光散射,而沿垂直液晶分子取向方向的偏振光,由于液晶折射率 n_o 与聚合物折射率 n_p 相匹配,成了同种光介质,就会使光透过。基于剪切液晶原理制作的散射偏光玻璃还具有独有的视角特性,本文给出这方面的研究报道。

2 实 验

样品制备所用的向列相液晶材料是石家庄鹿泉新型电子材料厂提供的 PDLCO05,其双折射 $n_o = 1.517, n_e = 1.723$;所用预聚合物是 30% 的环氧树脂 DCL3000,65%聚脂丙烯酸酯 MR100,5% 的光引发剂 TPO 的紫外光固化预聚物;将液晶与预聚合物以 2 : 3 的质量百分比混合成液晶胶。使用的玻璃是 3 mm 厚 ITO 透明导电玻璃;所用的衬垫料是深圳纳微科技公司提供的直径 20 μm 塑料微球。将玻璃清洗干净,在一张玻璃上撒布 20 μm 衬垫粉微球,之后盖上另一张玻璃,两张玻璃大部分重合,上下留出小部分不重合的台阶边(方便后续施加应力实验)。用注射器将液晶胶滴在台阶处下面玻璃上,靠毛细现象使液晶胶充满在两张玻璃间重合部分。把夹着液晶胶的两张玻璃放置于多根 40 W 紫外灯下进行紫外曝光固化,样品由固化前透明变成固化后散射毛玻璃。用不锈钢方管制作了镜框,在镜框一侧面安装了八宝顶丝,顶丝与玻璃之间有胶皮隔垫,拧转顶丝就可以方便施加剪切应力。对样品施加剪切应力时,样品变成半透明状态,具有散射偏光片功能,如图 1 所示。

样品后面是电脑液晶显示器屏幕,透光轴在西北角方向,图中,(a)光轴平行,(b)平行前翻,(c)平行后翻,(d)平行左翻,(e)平行右翻,

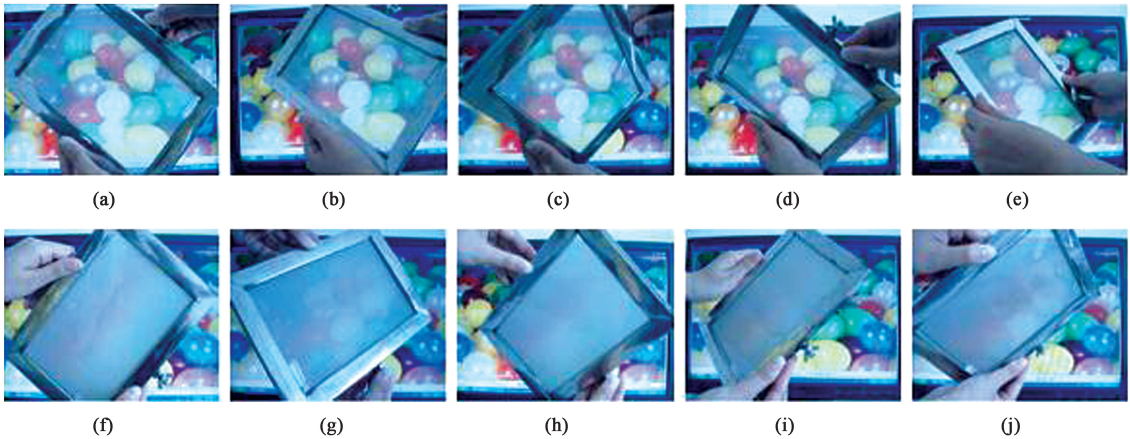


图 1 剪切液晶散射偏光玻璃外观。(a)光轴平行;(b)平行前翻;(c)平行后翻;(d)平行左翻;(e)平行右翻;(f)光轴正交;(g)正交前翻;(h)正交后翻;(i)正交左翻;(j)正交右翻

Fig. 1 Appearance of shear liquid crystal scattering polarized glass(a)parallel to the optical axis;(b)parallel turn front;(c)parallel turn back;(d)parallel turn left;(e)parallel turn right;(f)orthogonal to the optical axis;(g) orthogonal turn front;(h) orthogonal turn back;(i) orthogonal turn left;(j) orthogonal turn right

(c)平行后翻,(d)平行左翻,(e)平行右翻,(f)光轴正交,(g)正交前翻,(h)正交后翻,(i)正交左翻,(j)正交右翻。直观上发现,透过样品看显示器图片,散射偏光玻璃的透光轴与液晶显示器透光轴平时时,图 1(d)的侧面看比图 1(a)的正面看还清楚些;散射偏光玻璃的透光轴与液晶显示器透光轴正交时,图 1(j)的侧面看比图 1(f)的正面看更漏光些。

对样品测试透光率随入射光角度变化曲线,所用仪器为成都世纪中科仪器公司 ZKY-LCDEO-2 型液晶电光效应综合实验仪,测试光路如图 2 所示。水平转动样品条件下,不放置偏振器测得非偏振光视角特性曲线,放置偏振器并转动偏振器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 偏振光入射的偏振光视角特性曲线(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)。

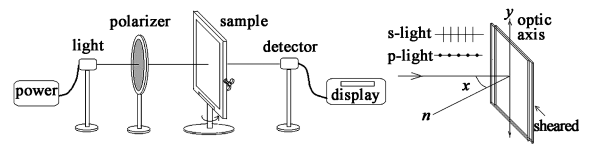


图 2 测试光路
Fig. 2 Test light path

图 2 中,样品装在不锈钢镜框中,一侧的边框上有八宝顶丝,对样品从左右侧面施加剪切应力时,样品变半透明态,成为散射偏光玻璃,其透光轴在垂直水平剪切方向的竖直方向。剪切作用使前后两片玻璃发生相对移动,导致聚合物分散液晶膜中液晶微滴产生形变,由球形微滴变成倾斜椭球微滴,如图 3 所示。液晶分子有沿椭球长轴大致取向,造成沿垂直椭球长轴方向的偏振光透射,平行椭球长轴方向的偏振光散射。而沿着椭

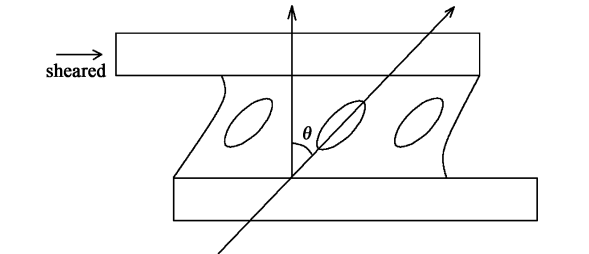


图 3 液晶微滴倾斜示意图
Fig. 3 Diagram of the tilt liquid crystal droplet

球长轴方向看去,双折射现象减弱,透光率更高。测试透光率随入射光角度变化曲线,如图 4 所示。图 4(a)是夹胶 ITO 玻璃透光率随光入射角变化的视角特性曲线,图 4(b)是散射偏光玻璃的视角特性曲线,图 4(c)是不同剪切应力情况下的非偏振光视角特性。

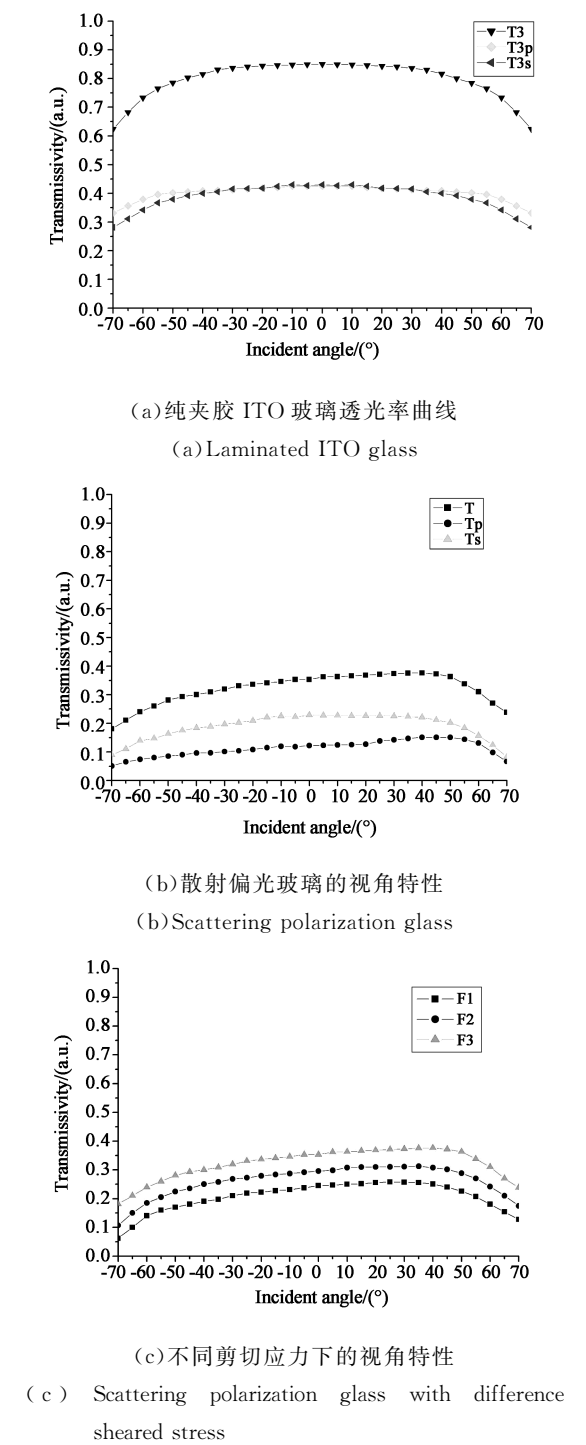


图 4 视角特性测试曲线
Fig. 4 Test curve of viewing angle characteristic

图 4(a)夹胶 ITO 玻璃的胶中没有加入液晶,由此得到纯夹胶 ITO 玻璃全透明态曲线。曲线 T_3 是非偏振光的透光率随光入射角变化的曲线, T_{3p} 是平行入射面的 p 偏振光的透光率随光入射角变化的曲线, T_{3s} 是垂直入射面的 s 偏振光的透光率随光入射角变化的曲线,这三条曲线都是关于玻璃表面法线对称的。图 4(b)是聚合物分散液晶膜在施加剪切应力情况下,从散射雾态变半透明态,成为散射偏光玻璃的视角特性曲线。曲线 T 是非偏振光的透光率随光入射角变化的曲线, T_p 是平行入射面的 p 偏振光的透光率随光入射角变化的曲线, T_s 是垂直入射面的 s 偏振光的透光率随光入射角变化的曲线,这三条曲线都是关于玻璃表面法线不对称的。散射偏光玻璃对于 p 光具有较强的散射作用,而对于 s 光则具有较高的透射作用。图 4(c)是聚合物分散液晶膜在施加不同剪切应力情况下的非偏振光视角特性曲线,所施加剪切力的关系为 $F_3 > F_2 > F_1$ (F_1 拧转顶丝量小, F_2 顶丝旋进稍大, F_3 顶丝旋进至拧不动)。

3 理 论

样品的透过率复杂关系如下:

$$\begin{aligned} T &= T_1 T_2 T_3 + T_0 = \\ &\frac{1}{2} [\cos(x - \theta) + 1] k (1 - e^{-\theta/\Theta}) \\ &\quad [a + bx + cx^2 + dx^3], \quad (1) \\ T_1 &= \frac{1}{2} [\cos(x - \theta) + 1], \\ T_2 &= k (1 - e^{-\theta/\Theta}), \\ T_3 &= [a + bx + cx^2 + dx^3], \end{aligned}$$

其中: T 为样品透过率, T_1 为液晶微滴透过率随入射光角度 x 和液晶微滴椭球长轴与玻璃表面法线夹角 θ 变化函数, x 和 θ 用弧度表示。液晶分子在垂直玻璃法线方向一致取向时 ($\theta = 0, x = 0$), 对应电控调光玻璃透明态, 正面观察没有偏光效应; 而液晶分子在玻璃平面内一致取向时 ($\theta = 90^\circ, x = 0$), 对应完全偏光状态, 一半光透过, 另一半光散射。 T_2 为液晶微滴椭球化导致液晶分子序参数变化对透光率影响函数。样品不受剪切作用, 液晶分子没有取向时, $T_2 = 0$, 对应散射雾态; 而拉伸液晶, 液晶分子沿拉伸方向排列, 散射

偏光片效果最佳, 这时对应液晶分子取向序参数最大, 因此说 Θ 为特征角, 取 90° ; 在 ($\theta = 90^\circ, x = 90^\circ$) 时, 令 $T_2 = 1$, 需取系数 $k = e / (e - 1) = 1.5819$ 。 T_3 为玻璃透过率随角度变化函数, 即图 4(a) 曲线。由于透明材料透光率经典表达式菲涅耳公式通常只能给出单个界面的透光率和反射率, 实际样品界面多于单个界面。在大角度入射时 ($> 60^\circ$), 按照菲涅耳公式计算的单个界面的透光率已经降到很低 (~ 0.6), 但是实际样品多个界面, 测量却发现透光率仍然比较高 (> 0.7), 所以不能用菲涅耳公式计算透光率, 我们采用对实验曲线做拟合的方法找到表达式。这个函数形式 (1) 式是根据情况进行针对性的合理假设, 不是推导得到的。

拟合过程, 把角度换算成弧度。

$$T_3(0) = [a + bx + cx^2 + dx^3] = a = 0.85, \quad (2)$$

$$\begin{aligned} T_3(-20^\circ) &= [a + bx + cx^2 + dx^3] = \\ 0.85 - 0.348b + 0.121c - 0.042d &= 0.844, \quad (3) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} T_3(20^\circ) &= [a + bx + cx^2 + dx^3] = \\ 0.85 + 0.348b + 0.121c + 0.042d &= 0.844. \quad (4) \end{aligned}$$

解出一系数, $c = 0.049$, 即拟合表达式:

$$T_{3\text{中}} = 0.85 - 0.049x^2 \quad (5)$$

由拟合曲线左右对称性, 选择:

$$\begin{aligned} T_3(30^\circ) &= [A + Bx + Cx^2 + Dx^3] = \\ A + 0.522B + 0.272C + 0.142D &= 0.837, \quad (6) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} T_3(40^\circ) &= [A + Bx + Cx^2 + Dx^3] = \\ A + 0.696B + 0.484C + 0.337D &= 0.815, \quad (7) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} T_3(50^\circ) &= [A + Bx + Cx^2 + Dx^3] = \\ A + 0.87B + 0.757C + 0.6585D &= 0.785, \quad (8) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} T_3(60^\circ) &= [A + Bx + Cx^2 + Dx^3] = \\ A + 1.044B + 1.0899C + 1.137D &= 0.733. \quad (9) \end{aligned}$$

解出 $C = 0.7644, D = -0.432, A = 0.9897, B = -0.5732$, 得到剪切液晶散射偏光玻璃透光率表达式:

左侧 ($\leq -30^\circ$):

$$T_- = 0.791 [\cos(x - \theta) + 1] (1 - e^{-\theta/\Theta}) \times$$

$[0.9897 + 0.5732x + 0.7644x^2 + 0.432x^3]$
中段($-30^{\circ} \sim 30^{\circ}$):
 $T = 0.791 [\cos(x - \theta) + 1] (1 - e^{-\theta/\Theta}) \times$
 $[0.85 - 0.049x^2]$
右侧($\geq 30^{\circ}$):
 $T_+ = 0.791 [\cos(x - \theta) + 1] (1 - e^{-\theta/\Theta}) \times$
 $[0.9897 - 0.5732x + 0.7644x^2 - 0.432x^3]$.

4 计 算

对于图 4(c) 曲线,极值点分别在 25° , 35° 和 40° ,对表达式(1)求导,极值角度与液晶微滴倾角存在关系, $x_p = 25^{\circ}$, 在中段,适用中段表达式:

$$\frac{dT}{dx} = \{ [-\sin(x_p - \theta)] [0.85 - 0.049x_p^2] + [\cos(x_p - \theta) + 1] [-0.098x_p] \} = 0$$
$$[\sin(x_p - \theta)] [0.85 - 0.049x_p^2] = - [\cos(x - \theta) + 1] [0.098x_p].$$

解出弱剪切力倾角约为 31.7° 。35°和 40°适用于右端表达式

$$\frac{dT}{dx} = \{ [-\sin(x - \theta)] [a + bx + cx^2 + dx^3] + [\cos(x - \theta) + 1] [b + 2cx + 3dx^2] \} = 0$$
$$[\sin(x - \theta)] [a + bx + cx^2 + dx^3] = [\cos(x - \theta) + 1] [b + 2cx + 3dx^2]$$

$x_p = 35^{\circ}$, $[\sin(x - \theta)] [0.826] = [\cos(x - \theta) + 1] [-0.1222]$,
 $[\sin(x - \theta)] = [\cos(x - \theta) + 1] [-0.1479]$,

解出中等强度剪切力的倾角约 51.8° 。
 $x_p = 40^{\circ}$, $[\sin(x - \theta)] [0.815] = [\cos(x - \theta) + 1] [-0.1364]$,
 $[\sin(x - \theta)] = [\cos(x - \theta) + 1] [-0.1673]$.

解出强剪切力的倾角约为 59° 。
样品透过率理论计算:尝试取 $\theta = 30^{\circ}$ 、 45° 、 60° ,计算透光率曲线,如图 5 所示。

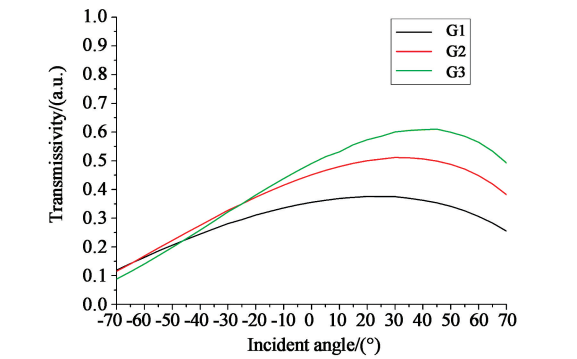


图 5 倾角 30° 、 45° 、 60° 透光率理论曲线
Fig. 5 Theoretical curve of transmittance of 30° 、 45° 、 60° angle

计建立的表达式基本反映了散射偏光玻璃的视角特性,即透光率曲线关于玻璃表面法线不对称,沿液晶微滴倾斜方向透光率比较高。设若表达式成立,由此根据实验曲线极值点可以解出液晶微滴倾斜椭球的倾角,同时也可以估计出剪切作用使上下两片玻璃产生了多大的位移 ΔL 。例如当解出液晶微滴倾角为 60° 时,假设聚合物分散液晶层厚度是 $H = 20 \mu\text{m}$,则有: $\Delta L = H \tan \theta = 34.64 \mu\text{m}$ 。但表达式还不够完备,曲线形状上描述不够“逼真”,在大角度入射下,理论曲线与测试曲线在左端差距还比较大,有待于对表达式进行修正。

5 结 论

剪切液晶散射偏光玻璃具有视角特性,液晶微滴呈倾斜椭球状,沿液晶微滴椭球长轴方向观

比较理论曲线图 4 和实验曲线图 3(c),所设

察,透光率比较高,透过样品看图片,比垂直玻璃表面看得还清楚。对样品做透光率随入射角变化曲线,得到不对称曲线,建立透光率随入射角变化

表达式,模拟计算曲线与实验测试曲线基本符合,由表达式能求得剪切液晶微滴椭圆倾斜方向和上下玻璃产生的位移。

参 考 文 献:

- [1] Drzaic P, Drzaic P S. Putting liquid crystal droplets to work: a short history of polymer dispersed liquid crystals [J]. *Liquid Crystals*, 2006, 33(11/12): 1281-1296.
- [2] Wu B G, Erdmanna J H, Doane J W. Response times and voltages for PDLC light shutters [J]. *Liquid Crystals*, 1989, 5(5): 1453-1465.
- [3] 丁兰,魏巍,范志新.基于应变液晶技术制备反式电控调光玻璃的研究[J].液晶与显示,2015,30(2):251-256.
Ding L, Wei W, Fan Z X. Research of reverse mode electronic controlled switchable glass based on stressed liquid crystal[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2015, 30(2): 251-256. (in Chinese)
- [4] Wu B G, West J L, Doane J W. Angular discrimination of light transmission through polymer-dispersed liquid-crystal films [J]. *J. Appl. Phys.*, 1987, 62(9): 3925-3931.
- [5] Malik P, Raina K K. Droplet orientation and optical properties of polymer dispersed liquid crystal composite films [J]. *Optical Materials*, 2004, 27(3): 613-617.
- [6] West J L, Zhang K, Zhang M, *et al.* Stressed liquid crystals and their application [C]// *Proc. of SPIE*, San Diego, California, USA: SPIE, 2005:29360L-59360-10.
- [7] Zhang G Q. *Stressed liquid crystals: Properties and applications* [D]. Ohio State; Kent State University, 2007.
- [8] Animori I, Priezjev N V, Pelcovits R A, *et al.* Optomechanical properties of stretched polymer dispersed liquid crystal films for scattering polarizer applications [J]. *Journal of Applied Physics*, 2003, 93(6): 3248-3251.
- [9] 韩国志,邵晔,徐华,等.基于定向电纺纤维膜的可调制偏振片的制备[J].高等学校化学学报,2009,30(1),185-190.
Han G Z, Shao Y, Xu H, *et al.* Preparation of photo-tunable polarizer based on ordered electrospun nano-fiber membrane [J]. *Chemical Journal of Chinese Universities*, 2009, 30(1): 185-190. (in Chinese)
- [10] 范志新,韦卫星,何燕和.剪切聚合物分散液晶散射偏光特性[J].光学技术,2011,37(1):71-75.
Fan Z X, Wei W X, He Y H. Scattering polarization properties of sheared polymer dispersed liquid crystal [J]. *Optical Technique*, 2011, 37(1): 71-75. (in Chinese)
- [11] 范志新,陈亮,刘磊.剪切液晶调光玻璃的试制[J].玻璃,2011,38(12):23-26.
Fan Z X, Liu L, Chen L. Preparation of sheared liquid crystal switchable windows [J]. *Glass*, 2011, 38(12): 23-26. (in Chinese)
- [12] 范志新,郑永磊,刘洋,等.应变液晶散射偏光片的试制[J].光学技术,2012,38(4):473-476.
Fan Z X, Zheng Y L, Liu Y, *et al.* Preparation of stressed liquid crystal scattering polarizer [J]. *Optical Technique*, 2012, 38(4): 473-476. (in Chinese)
- [13] 范志新,高攀.剪切液晶散射偏光玻璃的研制与应用[J].2014,40(4):367-370.
Fan Z X, Gao P. Preparation and application of sheared liquid crystal scattering polarizer glass [J]. *Optical Technique*, 2014, 40(4): 367-370. (in Chinese)

作者简介:丁兰(1980—),女,江苏无锡人,硕士研究生,讲师,主要从事电子和液晶显示技术研究。E-mail: dinglan@wx-stc.cn

裴伶会(1990—),女,河北唐山人,河北工业大学理学院应用物理系 2014 级在读硕士生。

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