

文章编号:1007-2780(2019)05-0489-07

液晶电控调光镜研究

董世卓*, 张路瑶, 李博颖, 李健飞, 范志新

(河北工业大学 理学院, 天津 300401)

摘要:利用 TN-LCD 液晶盒和不同的偏光片组合制作出电控调光镜样品,其外观具有半透明视觉效果。在施加电压后,从一侧看是黑镜子或雾镜子视觉效果,而从另一侧看则呈现为黑玻璃或毛玻璃的视觉效果。对样品进行电光特性测试,吸收-反射电控镜和散射-反射电控镜的阈值电压为 2.4 V,饱和电压为 5.2 V。吸收-反射电控镜的开态透过率为 25.3%,关态透过率为 0.7%;散射-反射电控镜的开态透过率为 20.8%,关态透过率为 10.1%。吸收-反射电控镜与散射-反射电控镜相比而言,前者的关态和开态具有良好的透过率对比变化,而后的对比变化较差有待提高。运用琼斯矩阵理论对器件原理进行分析,最后对该制品的应用与产业化前景做出讨论。

关键词: TN 液晶盒;电控调光镜;反射偏光片;散射偏光片;琼斯矩阵

中图分类号: O753+.2 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/YJYXS20193405.0489

Research of liquid crystal electronically controlled switchable mirror

DONG Shi-zhuo*, ZHANG Lu-yao, LI Bo-ying, LI Jian-fei, FAN Zhi-xin

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

Abstract: The electronically controlled switchable mirror samples was produced by using TN-LCD liquid crystal cell and different polarizers, which appearance had the translucent visual effect. From one side, it looked like a black mirror or a fog mirror, while on the other side it looked like a black glass or frosted glass. The electro-optical properties of the samples were tested. The absorption-reflection mirror and the scatter-reflection mirror had a threshold voltage of 2.4 V and a saturation voltage of 5.2 V. The absorption-reflection mirror had an on-state transmittance of 25.3% and an off-state transmittance of 0.7%. The scattering-reflection mirror had an on-state transmittance of 20.8% and an off-state transmittance of 10.1%. Compared with the scatter-reflection controllable mirror, the absorbing-reflecting electric mirror had a good contrast change in the off-state and the on-state, while the scatter-reflection had a poor contrast change. The principle of the device was analyzed by Jones matrix theory. The application and industrialization prospects of the product were discussed.

Key words: TN-LCD; electronically controlled switchable mirror; reflective polarizer; scattering polarizer; jones matrix

收稿日期:2018-12-12;修订日期:2019-01-21.

基金项目:河北省科技重大专项(No.18041217Z)

Supported by Major Science and Technology Projects of Hebei Province(No.18041217Z)

* 通信联系人, E-mail: dsz201713@163.com

1 引言

众所周知,液晶显示已经是广泛应用的如日中天的显示技术,对于液晶显示器件的研究已经不是热点方向,而液晶非显示器件研究越来越受到重视。液晶非显示器件的研究包括生物、化学、物理、材料甚至工程等诸多领域:液晶可用于生物学及医药学研究的生物传感器,数据通信的光通讯开关,也可制作成调制远离可见光波段的中远红外(THz)及微波频率的相移器。此外,液晶还在激光镊子(Laser tweezers),可调FP滤波器和激光器,非线性光学的频率转换、液晶电致冷等方面发挥重要作用^[1-2]。液晶非显示器件产品如液晶调光膜、液晶调光眼镜、液晶电焊面罩、小尺寸液晶黑板等都已经实现产业化,且大尺寸液晶黑板正成为新的投资开发热点^[3-5]。

本文拟在前人的工作基础上采用TN液晶盒与几种新型偏光片的组合,对液晶电控调光镜这种新型液晶非显示器件进行实验研究与原理探讨。

2 实验

采用河北冀雅公司提供的较大面积电焊面罩产品用TN液晶盒(12 cm×5 cm),与吸收偏光片、反射偏光片及散射偏光片组合,制作电焊面罩光阀(样品1)、吸收-反射电控镜(样品2)和散射-反射电控镜(样品3)^[6]。吸收偏光片由河北冀雅公司提供,反射偏光片由3M公司提供^[7],散射偏光片为自制^[8-9]。

2.1 电焊面罩光阀

电焊面罩光阀是由TN液晶盒与吸收偏光片组合而成,即在TN液晶盒的表面贴上透光轴相互垂直的吸收偏光片制作成对比参考样品1。当不加电场时,TN液晶盒与偏光片的组合,由于旋光效应,构成常白型TN液晶盒,呈现如图1所示的半透明态玻璃外观。但当对其施加电场时,旋光效应消失,为两张吸收偏光片正交,从两侧看上去具有相同的视觉效果,并分别呈现出如图2和图3所示对称的遮光黑态玻璃外观。



图1 样品1通电前的半透明态

Fig.1 Translucent state of sample 1 before electrification



图2 样品1通电后一侧的遮光黑态

Fig.2 Shading black state on one side of sample 1 after electrification



图3 样品1通电后另一侧的遮光黑态

Fig.3 Shading black state on the other side of sample 1 after electrification

2.2 吸收-反射电控镜

吸收-反射电控镜是由TN液晶盒与吸收偏光片和吸收-反射复合偏光片组合而成,在TN液晶盒的一面是贴吸收偏光片,另一面则是贴吸收-反射复合偏光片(反射偏光片朝向玻璃,吸收偏光片朝外,即内置反射偏光片),即得到样品2。当不加电场时,呈现如图4所示的半透明态玻璃外

观。当对其施加电场时,从吸收偏光片一侧看上去,为吸收偏光片与反射偏光片正交,一半光被吸收,一半光被反射,呈现如图5所示的遮光镜子态外观;但从吸收-反射复合偏光片一侧看上去,效果是两张吸收偏光片正交,呈现如图6所示的遮光黑态玻璃外观。

2.3 散射-反射电控镜

散射-反射电控镜是由 TN 液晶盒与散射偏

光片和散射-反射复合偏光片组合而成,TN 液晶盒的一个表面是贴散射偏光片,而另一表面则是贴散射-反射复合偏光片(反射偏光片朝向玻璃,散射偏光片朝外,即内置反射偏光片),即得到样品3。当不加电场时,呈现如图7所示的半透明态玻璃外观。当对其施加电场时,从散射-反射复合偏光片一侧观察的效果为两张散射偏光片正交,呈现如图8所示的遮光雾态玻璃外观;但从仅



图4 样品2通电前的半透明态

Fig.4 Translucent state of sample 2 before electrification



图7 样品3通电前的半透明态

Fig.7 Translucent state sample 3 before electrification



图5 样品2通电后的遮光镜子态

Fig.5 Shading mirror state after sample 2 after electrification



图8 样品3通电后的遮光雾态

Fig.8 Shading fog state sample 3 before electrification



图6 样品2通电后的遮光黑态

Fig.6 Shading black state of sample 2 after electrification



图9 样品3通电后的遮光淡雾镜子态

Fig.9 Light-shielding fog mirror state sample 3 before electrification

贴有散射偏光片一侧观察,为散射偏光片与反射偏光片正交,一半光被散射,一半光被反射,视觉效果呈现出如图 9 所示的遮光淡雾镜子态外观。

3 样品测试

采用 FX2000L-RD 光纤光谱仪对液晶盒样品进行电光特性测试,测试波长为 632 nm。从电光特性测试曲线可知样品的阈值电压为 2.4 V,饱和电压为 5.2 V。

3.1 电焊面罩光阀

电焊面罩光阀(样品 1)的电光特性曲线如图 10 所示,样品 1 开态时透过率为 27.3%,关态时透过率为 0.5%,该样品在不同状态时具有显著透过率对比变化。

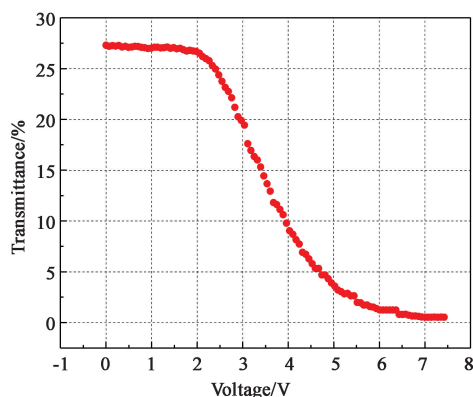


图 10 样品 1 的电压与透过率关系

Fig.10 Relationship between voltage and transmittance of sample 1

3.2 吸收-反射电控镜

吸收-反射电控镜(样品 2)的电光特性曲线如图 11 所示,样品 2 开态时透过率为 25.3%,关态时透过率为 0.7%,样品在不同状态时样品具有良好的透过率对比变化,且在关态时具有很好的反射效果。

3.3 散射-反射电控镜

散射-反射电控镜(样品 3)的电光特性曲线如图 12 所示,样品 3 开态时透过率为 20.8%,关态时透过率为 10.1%,由于散射膜的存在使得样品开关态的透射率对比度降低。

由测试结果可知,电焊面罩光阀比吸收-反射电控镜的开态透过率高 2%,关态透过率低 0.2%;比散射-反射电控镜的开态透过率高

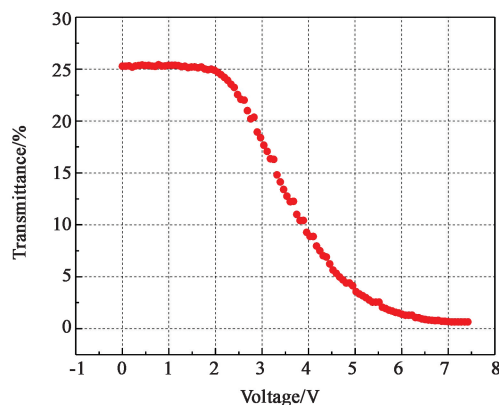


图 11 样品 2 的电压与透过率关系

Fig.11 Relationship between voltage and transmittance of sample 2

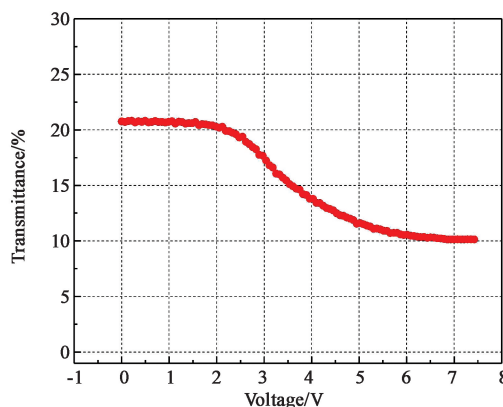


图 12 样品 3 的电压与透过率关系

Fig.12 Relationship between voltage and transmittance of sample 2

6.5%,关态透过率低 9.6%。吸收-反射电控镜比散射-反射电控镜的开态透过率高 4.5%,关态透过率低 9.4%。因此,电焊面罩光阀和吸收-反射电控镜与散射-反射电控镜相比具有更明显的透过率对比变化。

4 原理分析

4.1 偏光片原理分析

常用偏光片是吸收型偏光片,其原理众所周知^[10-12]。为描述出射光的偏振状态,采用琼斯矢量法定义的转换矩阵即琼斯矩阵来分别描述入射光和出射光。

设入射光琼斯矢量为 $E_1 = \begin{bmatrix} A_1 \\ B_1 \end{bmatrix}$,出射光为

$$\mathbf{E}_2 = \begin{bmatrix} A_2 \\ B_2 \end{bmatrix}, \text{ 则 } \begin{cases} A_1 = g_{11}A_1 + g_{12}B_1 \\ B_2 = g_{21}A_1 + g_{22}B_1 \end{cases}.$$

因此, $\mathbf{J} = \begin{bmatrix} g_{11} & g_{12} \\ g_{21} & g_{22} \end{bmatrix}$ 即为偏振器件的琼斯矩阵。

所以吸收偏光片琼斯矩阵的形式为:

$$\mathbf{J}_\theta = \begin{bmatrix} \cos^2\theta & \frac{1}{2}\sin 2\theta \\ \frac{1}{2}\sin 2\theta & \sin^2\theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos^2\theta & \sin\theta\cos\theta \\ \sin\theta\cos\theta & \sin^2\theta \end{bmatrix}. \quad (1)$$

反射偏光片为多层膜双折射偏光片,是由拉伸光学各向异性双折射小的薄膜材料与拉伸光学各向异性双折射大的薄膜材料交替重叠组成的。假设两种薄膜材料垂直拉伸方向折射率都是 n ,而沿拉伸方向折射率分别是 n_1 和 n_2 ,沿拉伸方向的非常光就会被全反射,而垂直于拉伸方向的寻常光就会全透射通过。反射偏光片也是已经商业化的产品,在大面板 TFT-LCD 上作为增亮膜而具有特殊应用。

因为吸收偏光片的琼斯矩阵为式(1),且光正入射时的透射琼斯矩阵和反射琼斯矩阵分别为:

$$\mathbf{J}_t = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \mathbf{J}_r = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

如果光束沿透射正方向传播振幅设为 1,光束被吸收为 0,光束反射为-1。反射偏光片若在相同的矩阵单元上表示透射和反射,会出现正负抵消的不正确结果。反射偏光片的透射琼斯矩阵等同于吸收偏光片琼斯矩阵,而反射琼斯矩阵应“互补”于透射琼斯矩阵,即如果垂直入

射的线偏振光偏振方向与透光轴方向夹角为 θ 时,则与反射轴方向的夹角就是 $\pi/2 - \theta$ 。所以反射偏光片的琼斯矩阵分为相互独立的透射矩阵和反射矩阵:

$$\mathbf{J}_\theta = \mathbf{J}_t + \mathbf{J}_r = \begin{bmatrix} \cos^2\theta & \sin\theta\cos\theta \\ \sin\theta\cos\theta & \sin^2\theta \end{bmatrix}_t + \begin{bmatrix} -\sin^2\theta & -\sin\theta\cos\theta \\ -\sin\theta\cos\theta & -\cos^2\theta \end{bmatrix}_r. \quad (3)$$

散射偏光片是新型偏光片,还处在待产业化之中,是由聚乙烯醇分散液晶流延膜经过拉伸后再复合保护膜而制成。其原理是沿拉伸方向液晶微滴折射率与聚乙烯醇折射率有比较大的差异,造成光散射,而垂直拉伸方向,液晶微滴折射率与聚乙烯醇折射率一致造成光透射。根据吸收偏光片琼斯矩阵形式,假设散射偏光片是弱偏振器件,其光学特性指标都还是与样品相关而非理想的。琼斯矩阵表达式的形式如下:

$$\mathbf{J}_{\text{散}} = \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} \\ J_{21} & J_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 \cos^2\theta + a_2 & b_1 \sin\theta\cos\theta + b_2 \\ b_1 \sin\theta\cos\theta + b_2 & c_1 \sin^2\theta + c_2 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

其中: θ 为偏振光与散射偏光片的夹角, a_2, b_2, c_2 表示由于漏光以及样品光学性能不理想等因素形成的基底, a_1, b_1, c_1 是散射振幅系数。

两吸收偏振片分别水平平行、正交放置,散射偏光片放置两偏光片正中间,使水平偏振光入射到散射偏光片上,然后将散射偏光片旋转一定角度,得到相应的出射光表达式如式(5)所示:

$$\mathbf{P}' = \mathbf{J}_{\text{散}} \mathbf{P} = \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} \\ J_{21} & J_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 \cos^2\theta + a_2 & b_1 \sin\theta\cos\theta + b_2 \\ b_1 \sin\theta\cos\theta + b_2 & c_1 \sin^2\theta + c_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 \cos^2\theta + a_2 \\ b_1 \sin\theta\cos\theta + b_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix}. \quad (5)$$

因散射偏光片的琼斯矩阵与样品的液晶掺杂浓度以及拉伸倍数等因素都有关系,因此对散射-反射电控镜样品所用的散射偏光片进行测试,并依据激光透过散射偏光片前后的光强变化量测得了式(5)中各系数的平均值: $a_1 = 0.62, a_2 = 0.05, b_1 = 0.75, b_2 = 0.07$ 。

再将两吸收偏振片分别竖直平行、正交放置,散射偏光片放置两偏光片正中间,使垂直偏振光入射到散射偏光片上,然后旋转散射偏光片一定角度,此时夹角与两吸收偏振片分别水平平行、正

交放置时夹角互余,所以对应的系数 $a_1 = c_1, a_2 = c_2$ 。所以,散射偏光片的琼斯矩阵为:

$$\mathbf{J}_{\text{散}} = \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} \\ J_{21} & J_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.62 \cos^2\theta + 0.05 & 0.75 \sin\theta\cos\theta + 0.07 \\ 0.75 \sin\theta\cos\theta + 0.07 & 0.62 \sin^2\theta + 0.05 \end{bmatrix}. \quad (6)$$

4.2 电控镜原理分析

4.2.1 吸收-反射电控镜原理

TN-LCD 液晶盒施加电压后,旋光效应消

失。此时,吸收偏光片和吸收-反射复合偏光片透光轴正交。自然光的琼斯矩阵为 $\mathbf{P} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} +$

$\begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$, 90° 反射偏光片的琼斯矩阵为:

$$\mathbf{J}_{\text{反}(90^\circ)} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}_t + \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}_r. \quad (7)$$

自然光从吸收-反射电控镜贴有吸收偏光片一侧入射,经过吸收偏光片后其琼斯矩阵为:

$$\mathbf{P}'_1 = \mathbf{J}_{\text{吸}(0^\circ)} \mathbf{P} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (8)$$

其中一些光透过,而其余的光被吸收,透过光 $\mathbf{P}'_1$ 再入射到反射偏光片,其琼斯矩阵为:

$$\mathbf{P}''_1 = \mathbf{J}_{\text{反}(90^\circ)} \mathbf{P}'_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}_t \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}_r \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -1 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (9)$$

由式(9)可知,入射的自然光被反射,无透射。因此在电控镜贴有吸收偏光片一侧观察时,呈现遮光镜子态。

当自然光从电控镜贴有吸收-反射复合偏光片一侧入射时,入射光等同于经过两个正交的吸收偏光片。自然光经过第一个吸收偏光片后转换为偏振光 $\mathbf{P}_2'$,当偏振光 $\mathbf{P}_2'$ 经过第二个吸收偏振片后形成的出射光表达式如式(10)所示:

$$\mathbf{P}_2'' = \mathbf{J}_{\text{吸}(90^\circ)} \mathbf{P}_2' = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (10)$$

此过程中自然光被完全被吸收,无透射和反射。因此从吸收-反射复合偏光片一侧观察时,电控镜呈现遮光黑态。

4.2.2 散射-反射电控镜原理

对散射-反射电控镜施加电压后,旋光效应消失。此时,散射偏光片和电控镜另一侧散射-反射复合偏光片的透光轴正交。

自然光 $\mathbf{P}$ 从散射-反射复合偏光片一侧入射

时,相当于仅穿过散射偏光片,其琼斯矩阵为:

$$\mathbf{P}_3' = \mathbf{J}_{\text{散}(0^\circ)} \mathbf{P} = \begin{bmatrix} 0.67 & 0.07 \\ 0.07 & 0.05 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0.67 & 0.07 \\ 0.07 & 0.05 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.67 \\ 0.07 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0.07 \\ 0.05 \end{bmatrix}, \quad (11)$$

其中一些光透过,而其余的光被散射,透过光会入射到电控镜另一侧的散射偏光片,琼斯矩阵为:

$$\mathbf{P}_3'' = \mathbf{J}_{\text{散}(90^\circ)} \mathbf{P}_3' = \begin{bmatrix} 0.05 & 0.07 \\ 0.07 & 0.67 \end{bmatrix} \left(\begin{bmatrix} 0.67 \\ 0.07 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0.07 \\ 0.05 \end{bmatrix} \right) = \begin{bmatrix} 0.3840 \\ 0.0938 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0.0070 \\ 0.0384 \end{bmatrix}. \quad (12)$$

因此在散射-反射复合偏光片一侧观察电控镜时,电控镜呈现遮光雾态。

自然光在仅贴有散射偏光片一侧入射时,经过散射偏光片后其琼斯矩阵等同于(11)式。一部分光被散射,一部分光被散射-反射复合偏光片反射,其琼斯矩阵为:

$$\mathbf{P}_4''' = \mathbf{J}_{\text{反}(90^\circ)} \mathbf{P}_4' = \begin{bmatrix} 0 \\ 0.07 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0.05 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -0.67 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -0.07 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (13)$$

此过程中自然光被散射和反射后使得电控镜呈现遮光淡雾镜子态。

5 结 论

采用 TN 液晶盒与吸收偏光片、反射偏光片和散射偏光片的不同组合,制作出具有不对称视觉效果吸收-反射电控镜和散射-反射电控镜样品。吸收-反射电控镜与散射-反射电控镜相比具有更明显的透过率对比变化和视觉效果,散射偏光片的质量还有待于提高。本文对两种液晶电控调光镜的实验研制和分析讨论,具有开发液晶非显示器件新应用的探索意义。两种液晶电控镜所呈现的不同视觉效果,可望作为新型高档装修材料找到应用市场。

参 考 文 献:

- [1] 杨傅子.近期液晶研究中的几个新方向—液晶非显示应用基础研究的进展[J].物理学进展,2008,28(2):107-129.
YANG F Z. New directions in recent liquid crystal studies—The progress in foundational research of non-display ap-

- plication of liquid crystals [J]. *Progress in Physics*, 2008, 28(2): 107-129. (in Chinese)
- [2] 陆延青.液晶光子学研究进展[J].光学与光电技术,2017,15(1):9-12.
LU Y Q. Research progress of liquid crystal optics [J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2017, 15(1): 9-12. (in Chinese)
- [3] 鞠纯,孙海涛,王璐,等.液晶高分子智能调光玻璃研究进展[J].华南师范大学学报(自然科学版),2017,49(1): 21-25.
JU C, SUN H T, WANG L, *et al.* Research progress on smart windows based on polymer liquid crystal [J]. *Journal of South China Normal University (Natural Science Edition)*, 2017, 49(1): 21-25. (in Chinese)
- [4] 张海龙.一种基于吸收、反射复合偏光片的液晶电控调光镜:中国,CN201820777877[P].2018-12-18.
ZHAGN H L. Liquid crystal electronically controlled dimming mirror based on absorption and reflection composite polarizer: CN, CN201820777877 [P]. 2018-12-18. (in Chinese)
- [5] 张海龙.一种基于散射、反射复合偏光片的液晶电控调光镜:中国,CN201820779576[P].2018-12-18.
ZHAGN H L. Liquid crystal electronically controlled dimming mirror based on scattering and reflection composite polarizer: CN, CN201820779576 [P]. 2018-12-18. (in Chinese)
- [6] 范志新.液晶器件工艺基础[M].北京:北京邮电大学出版社,2000.
FAN Z X. *Process Foundation of Liquid Crystal Devices* [M]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications Press, 2000. (in Chinese)
- [7] 范志新.偏光片制造技术[M].北京:科学出版社,2017.
FAN Z X. *Polarizer Manufacturing Technology* [M]. Beijing: Science Press, 2017. (in Chinese)
- [8] 裴伶俐.散射偏光片的制备与应用研究[D].天津:河北工业大学,2016.
PEI L H. Preparation and application of scattering polarizer [D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2016. (in Chinese)
- [9] 王宇,李博颖,范志新,等.干拉法制备散射偏光片实验研究[J].液晶与显示,2017,32(6):438-442.
WANG Y, LI B Y, FAN Z X, *et al.* Experimental research on preparation of scattering polarizer by dry stretching method [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2017, 32(6): 438-442. (in Chinese)
- [10] MEYER, R B. Piezoelectric effects in liquid crystals [J]. *Physical Review Letters*, 1969, 22(18): 918-921.
- [11] BRETENAKER F, LE FLOCHA. Laser eigenstates in the framework of a spatially generalized Jones matrix formalism [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 1991, 8(2): 230-238.
- [12] 任广军,李国华.偏光器件的 Jones 矩阵研究[J].光学技术,2003,29(5):578-580.
REN G J, LI G H. Jones matrix research of polarization device [J]. *Optical Technique*, 2003, 29(5): 578-580. (in Chinese)

作者简介:



董世卓(1990—),男,河北石家庄人,硕士研究生,2017年于邯郸学院获得学士学位,主要从事液晶器件物理实验研究。E-mail: dsz201713@163.com