

文章编号:1007-2780(2019)12-1131-05

液晶消色差偏振旋转器

杨艳灵, 张 弛, 孙 岩, 马红梅, 孙玉宝*

(河北工业大学 应用物理系, 天津 300401)

摘要: 液晶消色差偏振旋转器是一种可以改变入射偏振光状态的光学元件。为了在不移动偏振器件的情况下, 实现偏振光在正交方向的转变, 并在宽波段具有良好的消色差特性, 本文提出了一种由 3 个低扭曲向列相液晶盒组成的消色差偏振旋转器, 通过施加电压来控制液晶分子分布从而控制偏振光的状态。用 TechWiz LCD 1D 软件进行模拟, 在不加电压和平行偏光片情况下, 消色差偏振旋转器在 450~650 nm 范围内的漏光率小于 0.01, 可见光范围内的漏光率低于 4.5%, 与传统的一个扭曲向列相液晶盒组成的旋转器相比漏光率较低。施加电压之后, 透过率可达到 97.9% 以上, 并且液晶盒厚度在 2.2~2.5 μm 之间变化时, 消色差特性几乎不受影响, 这种结构的消色差偏振旋转器的对比度较高, 消色差性能良好, 响应时间快, 达到了偏振旋转器件的要求。

关键词: 消色差; 透过率; 偏振旋转; 对比度; 响应时间

中图分类号: TN27 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/YJYXS20193412.1131

Liquid crystal achromatic polarization rotator

YANG Yan-ling, ZHANG Chi, SUN Yan, MA Hong-mei, SUN Yu-bao*

(Department of Applied Physics, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China)

Abstract: Liquid crystal achromatic polarization rotator is an optical element which can change the state of incident polarized light. In order to realize the transformation of polarized light in orthogonal direction and have good achromatic performance in wide band without moving polarizing components, an achromatic polarization rotator composed of three low-twisted nematic liquid crystal cells is proposed to control the distribution of liquid crystal molecules by applying voltage to control the state of the polarized light. TechWiz LCD 1D software is used for simulation. In the case of no voltage and parallel polarizer, the light leakage rate of the chromatic polarization rotator in the range of 450~650 nm is less than 0.01, and the light leakage rate in the range of visible light is less than 4.5%, which is lower than that of the rotator composed of a traditional twisted nematic liquid crystal cell. When the voltage is applied, the transmittance can reach more than 97.9%, and when the thickness of the liquid crystal cell changes between 2.2~2.5 μm , the achromatic characteristic is almost unaffected. This structure of achromatic polarization rotator has high ratio, good achromatic performance and fast re-

收稿日期: 2019-07-18; **修订日期:** 2019-09-15.

基金项目: 国家重点研发计划(No.2018YFB0703701); 国家自然科学基金(No. 61475042)

Supported by National Key R&D Program of China (No. 2018YFB0703701); National Natural Science Foundation of China (No. 61475042).

* 通信联系人, E-mail: sun_yubao@163.com

sponse time which meets the requirements of polarization rotator devices.

Key words: achromatic; transmittance; polarization rotation; contrast; response time

1 引言

利用偏振旋转技术来控制光的偏振态在液晶显示、偏振成像、光通信等^[1-3]方面有着广泛的应用,设计偏振旋转器最简单的方法就是用半波片来转换线偏振光的方向,然而这种偏振旋转器^[4-7]的缺点是只能通过移动偏振器件来实现偏振光状态的转变。而液晶消色差偏振旋转器具有电控制能力、响应时间快、带宽宽、对比度高等优点,可以达到消色差偏振旋转器的基本要求。

目前为止,人们提出了许多关于偏振旋转器的设计方法,文献[8-9]中提出了由一个 TN 盒和两个单轴补偿膜组成的消色差偏振光开关,带宽较宽,对比度较高,在 400~700 nm 范围内透过率大于 97.8%,但响应时间为 35 ms,响应速度不够快;文献[10]提出由两个均匀盒和一个 TN 盒组成的消色差偏振旋转器,但带宽不够宽,并且只工作于不加电压一种情况;文献[11-12]提出的结构虽然可以达到较好的消色差效果,但在参数设置上比较复杂,变量较多。以上结构中使用的液晶层的相位延迟量都很大,从而在使用普通液晶材料时,液晶层厚度会很厚(通常大于 5 μm),5 μm 厚的液晶盒响应时间是 20~30 ms,再考虑到扭曲向列相液晶盒在响应过程中存在背流效应(Backflow effect),所以这些结构的响应速度不够快。针对之前人们提出的偏振旋转器存在的问题,在本文中我们提出了一种由 3 个低扭曲液晶盒组成的消色差偏振旋转器,在低扭曲液晶盒中不存在背流效应,并且 3 个液晶盒厚度都为 2.5 μm,小于传统盒厚的一半。不加电压时漏光率较低,加电压后透过率可以达到 97.9% 以上,并对这种结构偏振旋转器的对比度和响应时间进行了模拟计算,在 450~650 nm 之间具有大于 100 的对比度,上升时间为 0.174 ms,下降时间为 6.316 ms,参数设置等相对简单。这种偏振旋转器可以在不移动偏振器件的情况下,通过改变对液晶盒施加的电压来控制液晶指向矢分布从而达到控制偏振光方向的目的。液晶显示的带宽要求是可见光范围内(400~700 nm),对比度在 50 以上,本

文提出的液晶消色差偏振旋转器对比度能达到 100 以上,响应时间远低于 20 ms,因此符合液晶显示等领域的应用需求。

2 基本原理

三层低扭曲液晶盒组成的偏振旋转器结构,如图 1 所示,入射偏振光的偏振方向与入射侧的液晶分子取向方向相同,3 个液晶盒中相邻的界面处的液晶取向相同,液晶盒中的液晶旋转方向相同。针对该液晶器件设置,使用琼斯矩阵来表示偏振光的偏振状态, E_{in} 是光轴沿 X 方向的线偏振光,经过 3 个 TN 液晶盒之后,出射光的偏振状态用 E_{out} 表示:

$$E_{out} = M_{LC1} M_{LC2} M_{LC3} E_{in}$$

$$M_{LC1} = \begin{bmatrix} \cos(\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3) & -\sin(\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3) \\ \sin(\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3) & \cos(\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3) \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \cos X_1 - i \frac{R \sin X_1}{2 X_1} & \varphi_1 \frac{\sin X_1}{X_1} \\ -\varphi_1 \frac{\sin X_1}{X_1} & \cos X_1 + i \frac{R \sin X_1}{2 X_1} \end{bmatrix},$$

$$M_{LC2} = \begin{bmatrix} \cos(\varphi_2 + \varphi_3) & -\sin(\varphi_2 + \varphi_3) \\ \sin(\varphi_2 + \varphi_3) & \cos(\varphi_2 + \varphi_3) \end{bmatrix},$$

$$\begin{bmatrix} \cos X_2 - i \frac{R \sin X_2}{2 X_2} & \varphi_2 \frac{\sin X_2}{X_2} \\ -\varphi_2 \frac{\sin X_2}{X_2} & \cos X_2 + i \frac{R \sin X_2}{2 X_2} \end{bmatrix},$$

$$M_{LC3} = \begin{bmatrix} \cos \varphi_3 & -\sin \varphi_3 \\ \sin \varphi_3 & \cos \varphi_3 \end{bmatrix},$$

$$\begin{bmatrix} \cos X_3 - i \frac{R \sin X_3}{2 X_3} & \varphi_3 \frac{\sin X_3}{X_3} \\ -\varphi_3 \frac{\sin X_3}{X_3} & \cos X_3 + i \frac{R \sin X_3}{2 X_3} \end{bmatrix},$$

$$R = \frac{2\pi d \Delta n}{\lambda},$$

$$X_i = \sqrt{\varphi_i^2 + \left(\frac{R}{2}\right)^2},$$

$$E_{in} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix},$$

其中: M_{LC1} , M_{LC2} , M_{LC3} 分别表示 3 个 TN 液晶

盒的琼斯矩阵, $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ 分别为 3 个扭曲向列相液晶盒的扭曲角, $d, \Delta n, \lambda$ 分别为液晶盒厚、液晶材料的双折射率、入射光的波长。

3 模拟计算与分析

模拟计算中,采用的液晶材料的双折射率为 $\Delta n = 0.108$ (450 nm), 0.1 (550 nm), 0.095 (650 nm),介电各向异性为 5.3,转动粘滞系数为 $100 \text{ mPa} \cdot \text{s}$,弹性常数分别为 10.8, 9.5, 15.4 pN,液晶层厚度都为 $2.5 \mu\text{m}$ 。设置 3 个液晶盒的扭曲角度为变量,总扭曲角度为 90° ,预倾角为 2° ,平行偏光片角度为 0° ,使用 TechWiz LCD 1D 软件计算了由 3 个扭曲向列相液晶盒组成的偏振旋转器的透光特性,得到 3 个液晶盒的扭曲情况分别为: φ_1 ($90^\circ \sim 65^\circ$), φ_2 ($65^\circ \sim 20^\circ$), φ_3 ($20^\circ \sim 0^\circ$) 时,该设置具有最好的偏振旋转效应。如图 1 所示,在平行偏光片情况下,左图为不加电压时液晶的排列情况,入射线偏振光经过 3 个 TN 液晶盒之后,偏振方向旋转 90° ,光线不透过。右图是施加电压之后的液晶排列图,液晶分子被驱动到垂直于基板平面排列,此时液晶的延迟量为 0,入射偏振光的状态不发生变化,由于偏振片平行放置,所以光线透过。

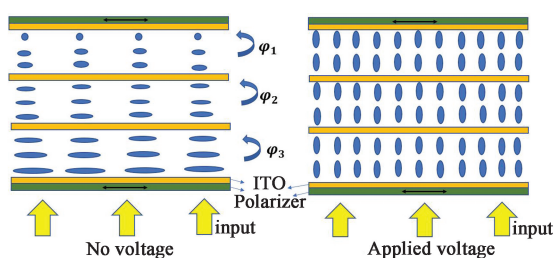


图 1 3-TN 盒的结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of the 3-TNLC cell

图 2 是透过率随电压的变化曲线,当施加电压后,透过率逐渐增大,电压在大于 12 V 时接近稳定,因此在计算这种偏振旋转器的消色差性能时,为了达到更好的效果,我们对每个 TN 液晶盒施加 20 V 的电压。响应过程如图 3 所示,上升时间约为 0.174 ms,下降时间约为 6.316 ms。

图 4 分别为偏振旋转器在驱动状态和未驱动状态下的透过率曲线。施加电压后光线透过,透过率为 97.9%~99.2%,如图中红线所示。在不

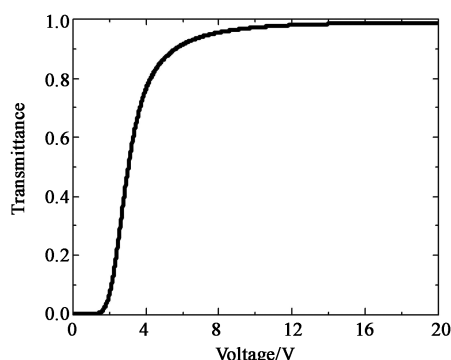


图 2 TN 盒的电光特性

Fig.2 Electro-optical characteristic of the TNLC

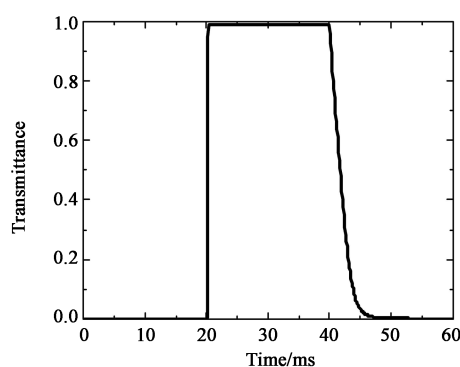


图 3 三个 TN 盒结构的偏振旋转器的响应过程

Fig.3 Response process of 3-TN LC

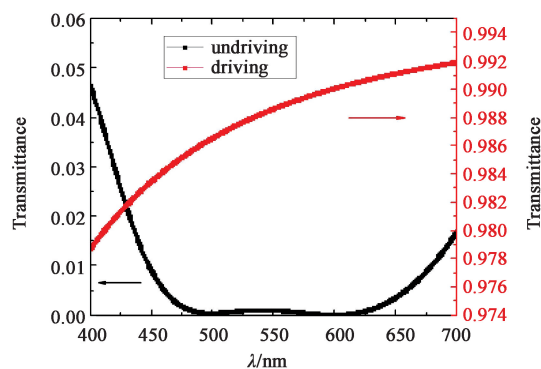


图 4 3-TNLC 结构的透过率(驱动 & 未驱动)

Fig.4 Transmittance of the 3-TNLC (with and without driving)

加电压时,透过率在可见光范围内具有很低的漏光率,漏光率低于 4.5%,尤其在 450~650 nm 之间,透过率小于 0.01,如图中黑线所示。在 450~650 nm 范围内,具有大于 100 的对比度,如图 5 所示,在 485~625 nm 范围内,具有 800 以上的对比度。

作为对比,我们计算了一个普通 TN 液晶盒

组成的消色差偏振旋转器在不加电压时的透过率,设置 TN 液晶盒的厚度为 $20\ \mu\text{m}$,预倾角设为 2° ,液晶材料的折射率与上述相同,使用 TechWiz LCD 1D 软件模拟计算了它的透过率光谱。图 6 是 3 个 TNLC 偏振旋转器和一个 TNLC 旋转器透过率的比较,从图中可以看出,一个传统的 90° TNLC 偏振旋转器在不加电压时的漏光率较高,且透过率波动比较大(图中黑线),而我们提出的这种结构具有较低的漏光率(图中红线),在 $450\sim 650\ \text{nm}$ 范围内,透过率小于 0.01,在可见光范围内,透过率低于 4.5%。

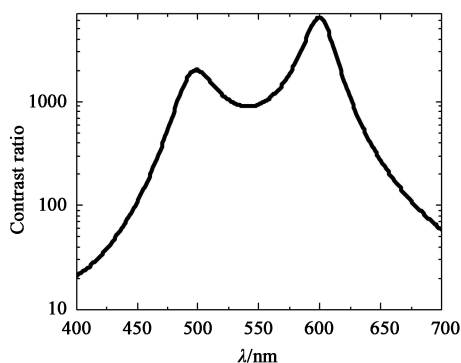


图 5 3-TNLC 结构的对比度与波长的关系

Fig.5 Contrast ratio vs. wavelength of the 3-TNLC

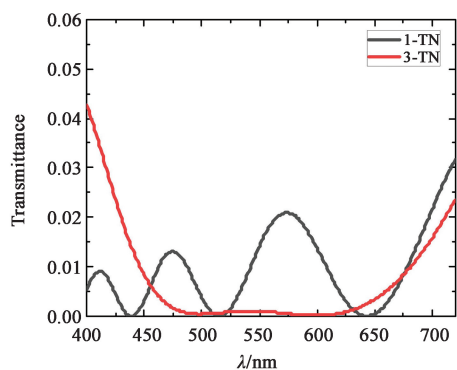


图 6 3-TN 与一个 TN 液晶盒的透过率比较(未驱动)

Fig.6 Transmittance of the 3-TNLC and 1-TNLC (undriving)

接下来计算了液晶盒厚对消色差性能的影响,图 7 是不加电压时,液晶盒厚为 $2.2\sim 2.5\ \mu\text{m}$ 时的透过率,当液晶盒厚分别为 $2.2, 2.3, 2.4, 2.5\ \mu\text{m}$ 时,透过率分别低于 6%, 4%, 3.5%, 4.5%, 在 $480\sim 600\ \text{nm}$ 之间,透过率都很小,当施加 20 V 的电压后,液晶分子沿着平行于入射线偏振光的方向排列,此时光线透过,理想的透过率为 1,由

于液晶盒两侧有 ITO 薄膜,光经过薄膜表面会发生折射,因此实际透过率低于 1。透过率光谱如图 8 所示,当液晶盒厚分别为 $2.2, 2.3, 2.4, 2.5\ \mu\text{m}$ 时,最低透过率分别为 98.2%, 98.1%, 98%, 97.9%, 消色差效果较好。通过计算液晶盒厚度对消色差效果的影响,说明盒厚在一定范围内变化时,透过率几乎是不受影响的。

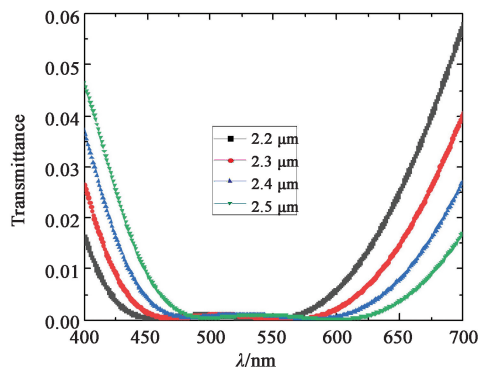


图 7 液晶盒厚对透过率的影响(未驱动)

Fig.7 Effect of cell thickness on transmittance (undriving)

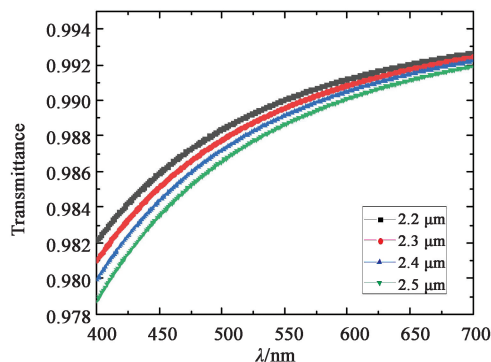


图 8 液晶盒厚对透过率的影响(驱动)

Fig.8 Effect of cell thickness on transmittance (driving)

4 结 论

本文对由 3 个低扭曲液晶盒组成的消色差偏振旋转器的消色差性能以及响应时间进行了模拟计算,不加电压时可见光范围内的透过率低于 4.5%,在 $450\sim 650\ \text{nm}$ 之间,透过率小于 0.01,加电压后的透过率在 97.9% 以上,在 $450\sim 650\ \text{nm}$ 之间具有大于 100 的对比度,在 $485\sim 625\ \text{nm}$ 之间具有 800 以上的对比度。3 个 TN 盒结构的

旋转器与一个 TN 盒结构的旋转器相比,具有漏光率低和响应速度快的优点。这种消色差性能较

好的液晶消色差偏振旋转器在光通信中有着广泛的应用。

参 考 文 献:

- [1] 杨登科,吴诗聪.液晶器件基础[M].郭太良,周雄图,译.北京:科学出版社,2016.
YANG D K, WU S T. *Fundamentals of Liquid Crystal Devices* [M]. GUO T L, ZHOU X T, trans. Beijing: Science Press, 2016. (in Chinese)
- [2] 万冀豫,冯贺,汪栋,等.液晶显示器侧视角发红机理分析及改善[J].液晶与显示,2018,33(1):38-42.
WAN J Y, FENG H, WANG D, *et al.* Mechanism analysis and improvement of reddish side-view on LCD [J]. *Chinese Journal of Liquid crystals and displays*, 2018, 33(1): 38-42. (in Chinese)
- [3] 甘世奇,陈向宁,刘鹏,等.液晶光谱偏振系统的透射谱研究[J].液晶与显示,2017,32(2):97-103.
GAN S Q, CHEN X N, LIU P, *et al.* Transmittance spectrum in the liquid crystal spectro-polarimetric system [J]. *Chinese Journal of Liquid crystals and displays*, 2017, 32(2): 97-103. (in Chinese)
- [4] 张弛,郭玉强,孙玉宝.液晶消色差偏振光开关[J].液晶与显示,2018,33(2):109-115.
ZHANG C, GUO Y Q, SUN Y B. Liquid crystal achromatic polarized switch [J]. *Chinese Journal of Liquid crystals and displays*, 2018, 33(2): 109-115. (in Chinese)
- [5] 李雪梅,陈胜钰.消色差偏振旋转器的优化设计[J].闽江学院学报,2008,29(2):33-35.
LI X M, CHEN S Y. Optimum design of composite achromatic circumvolution polarimeter [J]. *Journal of Minjiang University*, 2008, 29(2): 33-35. (in Chinese)
- [6] 薛冬,李国华,郝殿中,等.复合消色差 1/4 波片的再研究[J].激光技术,2004,28(2):184-185,192.
XUE D, LI G H, HAO D Z, *et al.* Achromatic analysis of the two-in-one composite 1/4 wave-plate [J]. *Laser Technology*, 2004, 28(2): 184-185, 192. (in Chinese)
- [7] KOMANDURI R K, KIM J, LAWLER K F, *et al.* Multi-twist retarders for broadband polarization transformation [C]//*Proceedings Volume 8279, Emerging Liquid Crystal Technologies VII*. San Francisco, California, United States: SPIE, 2012, 8279: 82790E1.
- [8] 王琼华,成建波.带有补偿膜的扭曲相列液晶宽带快速偏振光开关[J].光子学报,2005,34(3):357-360.
WANG Q H, CHENG J B. An achromatic twisted nematic liquid crystal polarization switch with a compensated film [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, 34(3): 357-360. (in Chinese)
- [9] WANG Q H, WU T X, ZHU X Y, *et al.* Achromatic polarization switch using a film-compensated twisted nematic liquid crystal cell [J]. *Liquid Crystals*, 2004, 31(4): 535-539.
- [10] ZHUANG Z Z, KIM Y J, PATEL J S. Achromatic linear polarization rotator using twisted nematic liquid crystals [J]. *Applied Physics Letters*, 2000, 76(26): 3995-3997.
- [11] WU T X, HUANG Y H, WU S T. Design optimization of broadband linear polarization converter using twisted nematic liquid crystal [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2003, 42(1A/B): L39-L41.
- [12] WANG Q, FARRELL G, FREIR T, *et al.* Optimal design of broadband linear polarization converters/switches [J]. *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, 2005, 7(1): 47-50.

作者简介:



杨艳灵(1994—),女,河北衡水人,硕士研究生,2017年于邢台学院获得学士学位,主要从事液晶器件方面的研究。
E-mail: 597266467@qq.com



孙玉宝(1975—),男,河北沧州人,教授,2010年于河北工业大学获得博士学位,主要从事液晶显示器件方面的研究。E-mail: sun_yubao@163.com