

文章编号:1007-2780(2019)11-1061-06

消色差偏振旋转器

杨艳灵,张 弛,郭玉强,孙 岩,李小帅,刘宁宁,马红梅,孙玉宝*

(河北工业大学 应用物理系,天津 300401)

摘要:消色差偏振旋转器是一种可以改变入射偏振光偏振方向的光学元件,在较宽波长范围内线偏振光通过该系统获得相同的旋转是偏振旋转器的优化设计目标。文中提出了两种结构的消色差偏振旋转器,一种是由 6 片波片组成的,另一种是由 4 片波片组成的。利用 TechWiz LCD 1D 软件进行模拟,其中由 4 片波片组成的偏振旋转器透过率可以达到 99.75% 以上,漏光率低于 0.15%;由 6 片波片组成的消色差偏振旋转器的透过率可以达到 99.8%~99.95%;漏光率低于 0.12%。并且波片厚度在一定范围内变化时,透过率不受影响。结果表明这种消色差偏振旋转器可以实现入射线偏振光在正交方向的变化,且结构设计,参数设置较简单,消色差性能良好,符合消色差偏振旋转器的基本要求。

关键词:消色差;透过率;偏振旋转;线偏振光;波片

中图分类号:TN27 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/YJYXS20193411.1061

Achromatic polarization rotator

YANG Yan-ling, ZHANG Chi, GUO Yu-qiang, SUN Yan, LI Xiao-shuai,
LIU Ning-ning, MA Hong-mei, SUN Yu-bao*

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

Abstract: Achromatic polarization rotator is a kind of optical element which can rotate the polarization angle of incident polarized light, its optimized aim is the same rotational angle for the polarized light through the rotator in wider wavelength range. In this paper, we present two kinds of achromatic polarization rotators. One is composed of six wave plates. The other is composed of four wave plates. TechWiz LCD 1D software is used for simulation. The transmittance of the polarization rotator composed of four wave plates can reach more than 99.75%, and the light leakage is lower than 0.15%. The transmittance of achromatic polarization rotator composed of six wave plates can reach 99.8%~99.95%, and the light leakage is lower than 0.12%. Moreover, when the thickness of the wave plate change within a certain range, the transmittance is not affected. The results show that the achromatic polarization rotator can realize the change of the polarized light in the orthogonal direction, and its structure design, parameter setting are simple, besides the achromatic performance is better, which meets the basic requirements of achromatic polarization rotator.

收稿日期:2019-07-04; **修订日期:**2019-09-04.

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

Key words: achromatic; transmittance; polarization rotation; linearly polarized lights; wave plates

1 引言

消色差偏振旋转器是一种可以控制光的偏振状态的光学元件,在光学测量、液晶显示、光通信、光谱偏振成像等^[1-3]方面有着广泛的应用,因此对消色差偏振旋转器的研究有着重要意义。

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[4-5]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,但这种设计存在较为严重的漏光现象;文献[6]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;文献[7-8]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。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两种结构的消色差偏振旋转器,一种由 4 片波片组成,透过率可以达到 99.82% 以上,漏光率低于 0.12%;用 4 个平行液晶盒代替四波片,组成的偏振旋转器消色差性能良好,对比度高于 800;另一种由 6 片波片以一定的方位角组合而成,在可见光范围内的透过率可以达到 99.8%~99.95%;偏振片平行放置时,漏光率低于 0.15%。当波片厚度在一定范围内变化时,偏振旋转器的消色差性能不受影响。

2 理论分析

波片是一种光学各向异性材料^[9-12],偏振光的两垂直振动分量通过波片后会产生不同的相位延迟,从而改变偏振态。几个具有一定方位角的波片叠加可以用作偏振旋转器,如图 1 所示。

图 1(a)是偏振旋转器的基本结构,图 1(b)是波片的方位角,当起偏器光轴沿 X 方向时,入射光经起偏器后是沿 X 轴方向的线偏振光,当入射线偏振光经过与 X 轴夹角为 α 的几个叠加的波片后,光线转过 90° ,当检偏器与起偏器平行放置时光线不透过,理想透过率为 0,当检偏器与起偏器正交放置时,光线透过,理想的透过率为 1。通常用琼斯矢量来表示光的偏振状态,假设入射光波的波长为 λ ,偏振态为 $\vec{E}_i = [E_{xi} \ E_{yi}]^T$,通过一个厚

度为 d ,折射率为 n_e 和 n_o ,光轴方向与 X 轴夹角为 α 的波片时,出射光的偏振态表示为:

$$\begin{bmatrix} E_{xo} \\ E_{yo} \end{bmatrix} = G \begin{bmatrix} E_{xi} \\ E_{yi} \end{bmatrix} = R(-\alpha) \omega_0 R(\alpha) \begin{bmatrix} E_{xi} \\ E_{yi} \end{bmatrix},$$

其中:

$$R(\alpha) = \begin{bmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha \\ -\sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix},$$

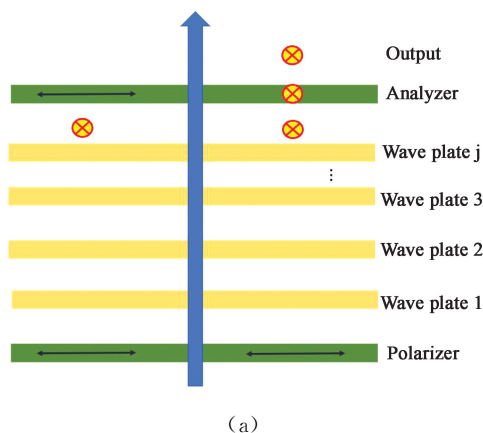
$$\omega_0 = \begin{bmatrix} e^{i\Gamma/2} & 0 \\ 0 & e^{-i\Gamma/2} \end{bmatrix},$$

其中 $\Gamma = \frac{2\pi d \Delta n}{\lambda}$, $\Delta n = n_e - n_o$ 。当入射光通过由几个波片叠加组成的偏振旋转器时,出射偏振光的偏振状态表示为:

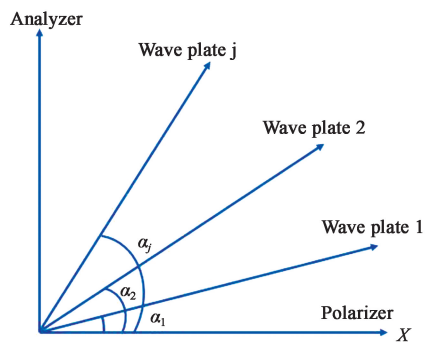
$$\begin{bmatrix} E_{xo} \\ E_{yo} \end{bmatrix} = G_j G_{j-1} \cdots G_1 \begin{bmatrix} E_{xi} \\ E_{yi} \end{bmatrix} =$$

$$\prod_{j=1}^j \begin{bmatrix} \cos \alpha_j & -\sin \alpha_j \\ \sin \alpha_j & \cos \alpha_j \end{bmatrix} \times$$

$$\begin{bmatrix} e^{i\Gamma_j/2} & 0 \\ 0 & e^{-i\Gamma_j/2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \alpha_j & \sin \alpha_j \\ -\sin \alpha_j & \cos \alpha_j \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{xi} \\ E_{yi} \end{bmatrix}$$



(a)



(b)

图 1 偏振旋转器的结构和原理。(a)结构;(b)角度。

Fig.1 Structure and principle of polarization rotator.

(a) structure; (b) orientation angles.

3 模拟计算与分析

计算中波片的双折射率为 $\Delta n = 0.108(450 \text{ nm}), 0.1(550 \text{ nm}), 0.095(650 \text{ nm})$ 。我们首先用 TechWiz LCD 1D 软件模拟了一片半波片的偏振旋转特性,设置半波片光轴的方位角为 45° ,计算不同厚度波片在可见光范围内的透过率,如图 2 所示。

可以看出一个半波片仅能在 $500 \sim 550 \text{ nm}$ 之间达到较高的透过率,带宽较窄,在可见光范围内,透过率仅能达到 40% 以上,不能实现在可见光范围内消色差的目的。因此,接下来计算了两片波片组成的偏振旋转器的消色差效果,两个波片的方位角分别为 23° 和 67° 。结果如图 3 所示,在可见光范围内,透过率可以达到 70% 以上,带宽相对一片波片的旋转器来说较宽,说明波片叠加可以提高在宽波段范围内的透过率。根据这一特点,在本文中提出了两种结构的偏振旋转器。

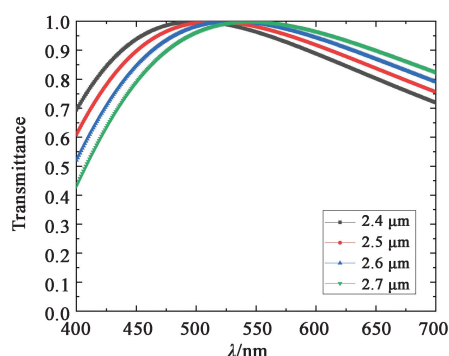


图 2 一片半波片的透过率

Fig.2 Transmittance of a half-wave plate

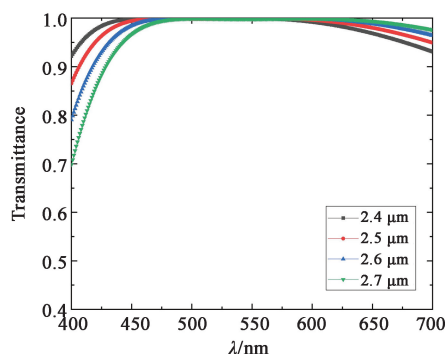


图 3 两片波片的透过率

Fig.3 Transmittance of two wave plates

4 两种结构的消色差偏振旋转器

单个波片的相位延迟等光学特性表现出严重的色散特性,难以适用于宽波段,而由多个单波片按照光轴成不同夹角组合而成的偏振旋转器能够补偿波长变化导致的光学特性的偏差,从而达到消色差的目的。在更多层波片结构情况下,需要对波片的厚度和光轴角度进行优选,考虑到每个波片包含两个可变参数,在优化过程中会产生海量的数据,因此根据经验和实际情况来进行初步的设置:(1)波片的厚度设置为相同厚度,符合生产制作的实际,在优化计算中可以减少波片数的变量;(2)上下对应波片的光轴角度互余,则可以减少波片数一半的变量。然后将所有变量设置在合适的范围内,逐一计算出透过率光谱,并进行透过率平均计算,来得到最优的参数组合。

4.1 四波片式偏振旋转器

由 4 个厚度相同的波片组成的消色差偏振旋转器的结构如图 4 所示,经过角度优化计算,得到波片的方位角从上到下分别为 $82^\circ, 60^\circ, 30^\circ, 8^\circ$ 时,该偏振旋转器具有最好的偏振旋转效果。入射偏振片光轴沿 X 轴方向,入射线偏振光经过 4 个波片后旋转了 90° ,当检偏器与起偏器正交放置时,光线透过;当检偏器与起偏器平行放置时,光线不透过。图 5、6 是检偏器与起偏器透光轴正交和平行时,偏振旋转器的透射光谱图。

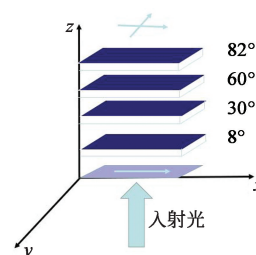


图 4 四波片组成的偏振旋转器

Fig. 4 Polarization rotator consisting of four wave plates

图 5 中黑线、红线、蓝线和绿线分别代表 4 个波片厚度都为 $2.2, 2.3, 2.4, 2.5 \mu\text{m}$, 偏振片正交放置时的透过率曲线,在可见光范围内透过率在 $99.75\% \sim 99.93\%$ 之间。图 6 是偏振片平行放置时的透过率曲线,可以看出,当波片的厚度在

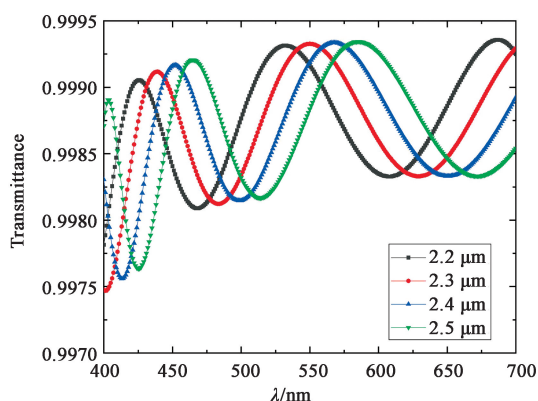


图 5 正交偏光片时的透射光谱

Fig.5 Transmittance spectra for crossed polarizers

2.2~2.5 μm 之间变化时,透过率低于 0.15%,漏光率较低。

因此通过模拟计算,可以看出这种四波片式偏振旋转器当波片厚度在 2.2~2.5 μm 之间时,透过率不受影响,并且可见光范围内的透过率波动范围较小,消色差性能良好。

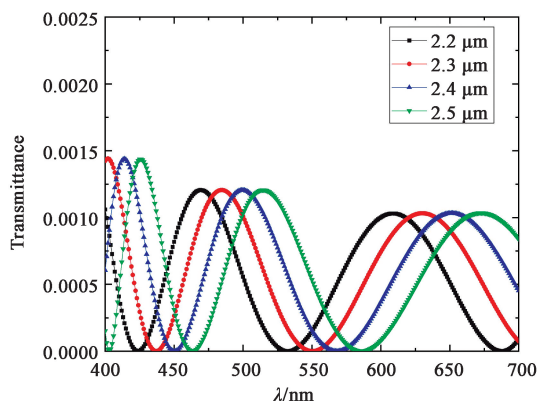


图 6 平行偏光片时的透射光谱(平行偏振片)

Fig.6 Transmittance spectra for parallel polarizers

4.2 四平行液晶盒式偏振旋转器

由液晶盒组成的偏振旋转器是通过施加电压来控制液晶分子指向矢分布,从而在不移动偏振片的情况下达到控制偏振光的偏振方向的目的。使用液晶盒代替波片,液晶光轴角度与上述偏振旋转器中的波片相同,液晶分子的预倾角设置为 2° ,液晶盒厚度为 2.3 μm 。液晶材料的双折射率为 $\Delta n = 0.108(450 \text{ nm}), 0.1(550 \text{ nm}), 0.095(650 \text{ nm})$,液晶的介电各向异性为 5.3,弹性常数为 10.8,9.5,15.4 pN,转动粘滞系数为 100 $\text{mPa} \cdot \text{s}$ 。当不加电压时,入射线偏振光通过器件后光线转

过 90° ,理想透过率为 0,当施加电压后,液晶分子垂直于液晶盒基板排列,入射偏振光的状态不发生改变,理想透过率为 1.0。但是在模拟计算中,由于驱动而增加的 ITO 薄膜对光有吸收效应,以及更多界面的反射和薄膜干涉效应,使得透过率不能达到 1.0。

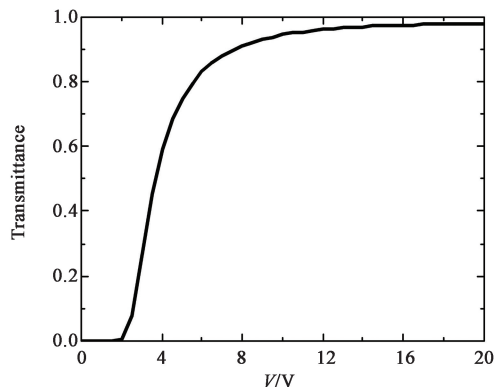


图 7 平行液晶盒的电光特性

Fig.7 Electro-optical properties of a rotator composed of parallel liquid crystal cells

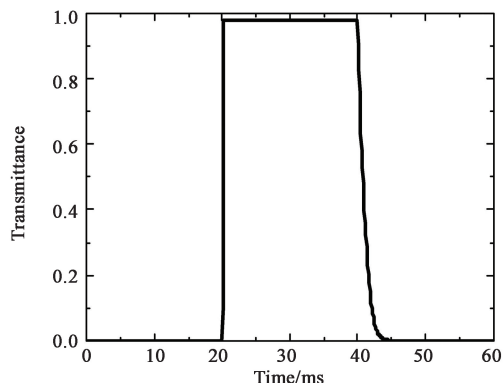


图 8 平行盒结构的消色差偏振旋转器的响应时间

Fig.8 Response time of achromatic polarization rotator with parallel LC cells

首先模拟了这种液晶盒的电光特性,如图 7 所示,当电压在 12 V 以上时,透过率接近稳定。所以在后面计算响应时间和驱动状态下的透过率时,为了达到更好的效果,我们对这种结构的偏振旋转器施加 20 V 的电压,响应过程如图 8 所示,上升时间大约为 0.189 ms,下降时间大约为 3.39 ms。

在不加电压的情况下,在可见光范围内的透过率低于 0.12%,如图 9 红色实线所示。加 20 V 电压后,液晶分子指向矢沿着垂直于液晶盒基板

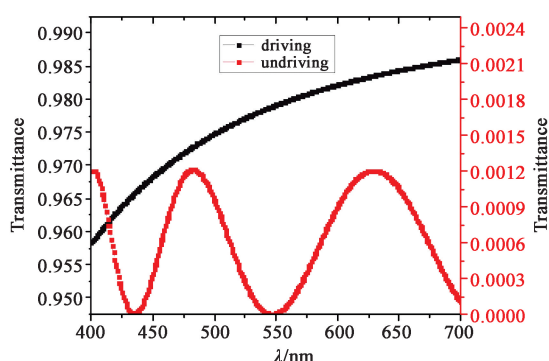


图 9 平行盒结构旋转器的透过率(驱动 & 未驱动)

Fig.9 Transmittance of the parallel cells (with and without driving)

的方向排列,此时液晶的双折射为 0,偏振片平行放置,光线透过,如图 9 黑线所示,透过率在 95.75%~98.5%之间,由于这种驱动型的偏振旋转器在每个液晶盒两侧添加了 ITO 层,而 ITO 界面之间具有反射和薄膜干涉效应,因此驱动状态下的透过率会低于 100%,在短波段范围,由于材料对光的吸收比较强,所以,透过率随波长增加呈现逐渐上升的趋势。对比度为驱动状态的透过率与未驱动状态下透过率的比值,如图 10 所示,在可见光范围内最低对比度为 800,对比度较高。

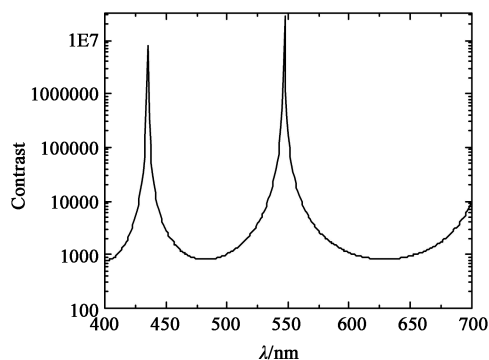


图 10 平行盒结构旋转器的对比度

Fig.10 Contrast of a rotator composed of parallel liquid crystal cells

4.3 六波片式偏振旋转器

六片波片式消色差偏振旋转器结构如图 11 所示,在两个偏振片中间放置 6 片波片,入射偏振光沿 X 轴方向。经过对波片的厚度和光轴角度的优化计算,波片的方位角从下到上分别为 3°, 13°, 33°, 57°, 77°, 87°。如图 12 所示,当波片厚度为 1.8, 1.9, 2.0 μm 时,偏振片正交放置,透过率

在 99.79%~99.95%之间。当偏振片平行放置时,透过率如图 13 所示,漏光率低于 0.12%,消色差性能良好。

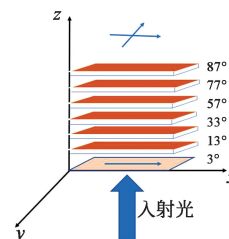


图 11 6 片波片组成的偏振旋转器

Fig.11 Polarization rotator consisting of six wave plates

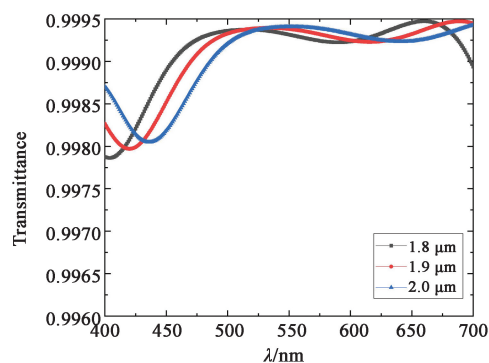


图 12 正交偏光片时的透射光谱

Fig.12 Transmittance spectra for crossed polarizers

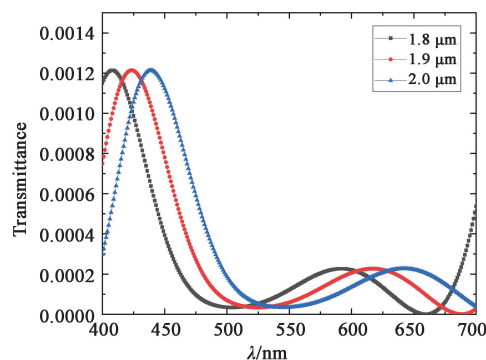


图 13 平行偏光片时的透射光谱

Fig.13 Transmittance spectra for parallel polarizers

5 结 论

本文对由波片组成的偏振旋转器的消色差性能进行了模拟计算,通过改变波片的厚度和方位角度,得到效果较好的设置方式,由 4 个波片组成

的偏振旋转器,最低透过率在 99.75% 以上,漏光率低于 0.15%;并对由液晶盒代替波片组成的偏振旋转器进行了模拟计算,其消色差性能良好,对比度高于 800;6 片式偏振旋转器的透过率可达到 99.8% 以上,漏光率低于 0.12%。在这两种结构中,波片的厚度都可以在一定范围内变化,而不影

响透过率;考虑到波片实际贴合过程中存在的角度误差,这两种优化结果中的波片光轴角度在偏差 1° 以内,对光谱影响都很小。这种消色差性能较好的偏振旋转器在显示方面有着重要的应用;在光通信中,可以降低串扰值;在偏振光谱成像中可以实现良好的光谱均匀性。

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] 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)
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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: L39-L41.
- [8] 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.
- [9] KOMANDURI R K, KIM J, LAWLER K F, *et al.* Multi-twist retarders for broadband polarization transformation [C]//*Proceedings of SPIE Emerging Liquid Crystal Technologies VII*. San Francisco, California, United States: SPIE, 2012: 82790E.
- [10] 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)
- [11] 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)
- [12] 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)

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