

文章编号:1007-2780(2018)02-0109-07

液晶消色差偏振光开关

张 弛, 郭玉强, 孙玉宝*

(河北工业大学 应用物理系, 天津 300401)

摘要:为了实现全可见光波长范围内的偏振光偏振方向正交变化的可控性,我们研究了由液晶盒构成的消色差偏振光开关。研究了液晶波片的偏光旋转特性及响应特性,并与传统波片的偏光旋转效果进行对比,然后参考组合式消色差波片的设计,设计出了由多片液晶盒构成的消色差偏振光开关。使用 Tech Wiz LCD 1D 软件对两种结构的消色差偏振光开关进行模拟,得到其偏光旋转效果以及响应特性,并得到不同波长偏振光的对比度。模拟结果表明:本文中提出的两种结构的液晶消色差偏振光开关可以实现在较大波长范围内的偏振光方向的正交变化,同时出射偏振光具有较高的偏振度。在 20 V 驱动电压下,偏振旋转的上升时间 0.3 ms,下降时间 4.5 ms,符合实际器件中对于消色差偏振光开关的响应速度要求。

关键词:偏振光开关;消色差;液晶波片;响应时间

中图分类号:TP141.9 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/YJYXS20183302.0109

Liquid crystal achromatic polarized switch

ZHANG Chi, GUO Yu-qiang, SUN Yu-bao*

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

Abstract: In order to realize the controllability of orthogonal change of polarization direction of the polarized light in the whole visible wavelength range, we research the achromatic polarized light switch composed of liquid crystal wave-plates. The polarization rotation and response characteristics of a liquid crystal wave-plate are analyzed synthetically, and compared with the polarizing effect of the traditional wave-plate. Then, the achromatic polarized light switch is designed by referring to the design of the combined achromatic wave-plates. Two polarized light switches with two different structures are simulated by Tech Wiz LCD 1D software, and its polarization rotation effect and response characteristics were obtained. The contrast ratio of different wavelength polarized light was calculated. The simulation results show that the liquid crystal achromatic polarized light switches showed in this paper can realize the orthogonal change of the polarized direction of polarized light in the wide visible wavelength, and the polarized light has a high degree of polarization. Under the 20 V driving voltage, the

收稿日期:2017-07-17; **修订日期:**2017-08-11.

基金项目:国家自然科学基金 (No. 61475042, No. 11304074, No. 11274088), 河北省自然科学基金 (No. A2015202320, No. GCC2014048); 河北高校重点学科建设项目

Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 11304074, No. 61475042, No. 11274088); National Natural Science Foundation of Hebei Province (No. A2015202320, No. GCC2014048);

Key Subject Construction Project of Hebei Province University

* 通信联系人, E-mail: 1021416548@qq.com

turn on time is 0.3 ms and the turn off time is 4.5 ms for the polarization rotation switch. The results are fit for the requirements for achromatic polarized light switch.

Key words: polarization switch; achromatic; liquid crystal wave plate; response time

1 引言

偏振光开关是一种重要的光学器件,在彩色时序显示,3D 显示,光纤通讯,天文观测等诸多领域有着广泛的应用。偏振光开关是一种可以被驱动的器件,在不同的驱动状态下,透过偏振光开关的偏振光以不同的偏振方向出射,例如偏振方向为 0° 的线偏振光入射,在“开态”,即驱动状态下,出射光的偏振方向沿 0° 方向,在“关态”,即不驱动状态下,出射光偏振方向沿 90° 方向,在偏振光开关的设计中,要考虑到该器件对于各个波长的偏振光的作用效果,即消色差效果,液晶材料由于其折射率各向异性以及可以在电场作用下改变分子排列方向的特性成为了制作偏振光开关的热门材料。应用于显示器件的液晶盒是一种典型的偏振光开关,以 E 模式扭曲向列相液晶盒(Twist Nematic TN 盒)为例,在未驱动状态下,液晶分子在基板间均匀扭曲排列,入射光偏振方向沿液晶分子指向矢方向旋转 90° ,在驱动状态下,液晶分子垂直于基板排列,入射光在透过液晶盒时偏振方向不发生变化。但是液晶盒对于偏振光的作用依赖于波长,所以只有特定波长的光偏振方向发生 90° 变化,其余波长的光偏振方向发生其它变化,若设置检偏方向沿入射光偏振方向的检偏器,表现为在其它波长范围内存在漏光现象,即产生色差。在消色差方面,现在应用较为广泛的消色差装置是消色差波片,消色差波片由多片波片组成,不同波片的快轴之间有一定的夹角,可以在一定的波长范围内实现消色差偏光效果^[1-5]。现阶段的消色差偏振光开关大多基于有源扭曲向列相液晶盒(TN 盒)来实现,通过在液晶盒表面加上一层或多层补偿模或其它结构来弱化在未驱动状态下的红光和蓝光波段的漏光问题,这种结构可以有效地实现在加电压状态下沿入射偏振光偏振方向的偏振光输出,但在不加电压状态下,输出的正交于入射光偏振方向的偏振光仍然与 TN 盒的出射光类似,会在红光和蓝光波段产生较为严重的漏光现象,在实际应用中表现出色彩的偏蓝

及偏红^[6-10]。

考虑到液晶分子的折射率各向异性,上下基板处方位角一致的平行排列液晶盒为一定厚度时可以当作波片来使用。综合消色差波片与偏振光开关的结构,本文提出了由液晶波片构成的偏振光开关,研究了其在施加电压驱动和无电压驱动下的全波长范围内的偏振方向控制,具有良好的消色差特性和快速响应特性。

2 液晶波片

波片的作用原理如下,构成波片的材料折射率在不同方向上表现出各向异性,透过波片后,不同方向的偏振光之间产生相位延迟,从而改变偏振光的偏振态,用液晶盒代替半波片,要让液晶分子指向矢在垂直于光线传播方向的平面内,使液晶在偏振光传播过程中表现出各向异性,产生相位延迟,为了获得最大的相位延迟效果,通常设置液晶指向矢的取向与初始偏振光成 45° 。使用 Tech Wiz LCD 1D 软件模拟液晶半波片结构,使用的液晶材料参数如下: $K_{11}=11.7$ pN, $K_{22}=5.5$ pN, $K_{33}=14$ pN, $n_e=1.5977$, $n_o=1.4937$, $\Delta n=0.104$,在设置液晶波片的参数时,要满足 $\Delta nd=(2n+1)\lambda/2$,液晶盒厚度设置为 $2.5\ \mu\text{m}$,液晶盒中液晶分子沿水平方向排列,上下基板处液晶分子方位角一致,这种液晶盒可以作为半波片使用的,为了防止驱动过程中液晶盒内液晶分子反向偏转,设置 2° 的预倾角,在模拟中,液晶盒上下设置两片透光轴均沿 0° 方向的平行偏光片或者设置为 0° 和 90° 的正交偏光片,液晶分子方位角均为 45° ,预倾角 2° 。

首先对于液晶波片的偏光能力进行模拟,分别对传统波片结构和液晶波片结构计算不同波长的偏振光的偏光效果设置液晶分子指向矢方向以及半波片快轴方向与起偏器透光轴方向均呈 45° 夹角,则偏振光偏振方向被旋转 90° ,分别设置透光轴方向与起偏器透光轴方向平行以及垂直的检偏器,不同波长的光经过传统波片和液晶波片后,在两个不同放置偏光片角度情况下的透过率分别

为 T_0 (代表平行偏光片) 和 T_{90} (代表正交偏光片), 如图 1 所示, 进而得到出射偏振光的对比度 $Cr = T_{90}/T_0$, 如图 2 所示。

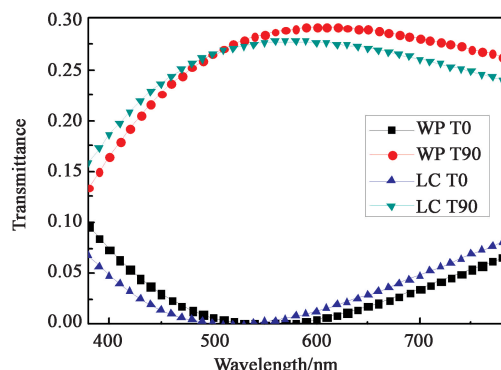


图 1 半波片与液晶波片的偏振旋转效果

Fig.1 Polarization rotation effect of half-wave plate and liquid crystal half-wave plate

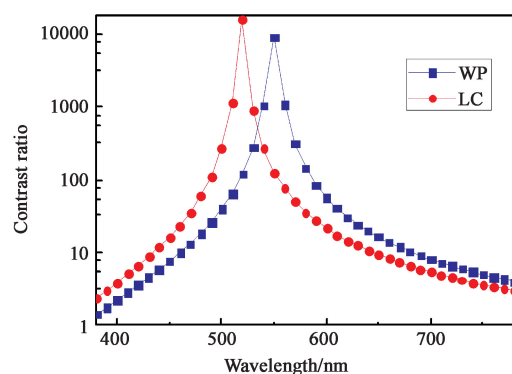


图 2 波片及液晶波片不同波长下的对比度

Fig.2 Contrast ratio of half-wave plate and liquid crystal half-wave plate with different wavelength

从图中可以看出, 液晶波片与传统波片的性质类似, 仅能在较小的波长范围内输出在理想方向上对比度较高的偏振光, 要用液晶波片制作消色差偏振光开关, 仍需要多个液晶盒的组合结构。

首先对液晶波片驱动特性进行模拟, 液晶盒上下设置两片透光轴沿 0° 方向的偏光片, 液晶分子方位角均为 45° , 预倾角 2° , 为了使模拟结果更加明显, 入射光使用波长为 500 nm 的单波长光, 在未驱动状态下, 液晶盒将入射光的偏振方向改变 90° , 不能透过检偏器, 产生暗态, 在驱动状态下, 由于液晶指向矢被驱动到平行于光传播方向, 因此液晶的等效双折射率为 0, 入射光偏振方向不发生变化, 光线透过检偏器, 形成亮态。通过模

拟计算单个液晶盒样品的电光特性曲线和响应时间曲线可以得到液晶波片的驱动特性, 其中最低透过率和最高透过率能表示液晶波片的偏光能力, 驱动电压可以作为液晶波片应用在器件中所需要的驱动电压的参考, 响应速度表示由液晶波片构成的偏振开关的偏振态转化速度。模拟结果透过与驱动电压的关系如图 3 所示, 可以看出, 采用如题参数设置的液晶波片, 驱动电压大于 10 V 后, 透过率增加不再明显, 为了获得更好的响应时间, 我们设置了 20 V 的驱动电压来计算响应时间, 动态响应过程如图 4 所示, 上升时间约为 0.3 ms, 下降时间约为 4.5 ms, 由多片液晶波片构成的消色差偏光开关, 对每一液晶盒单独驱动, 其响应特性与单个液晶波片保持一致。

由于该器件作为偏振光开关使用, 所以在驱动时要采用较高的驱动电压, 以完全消除液晶盒中的旋光效应, 20 V 是一个合适的驱动电压值。

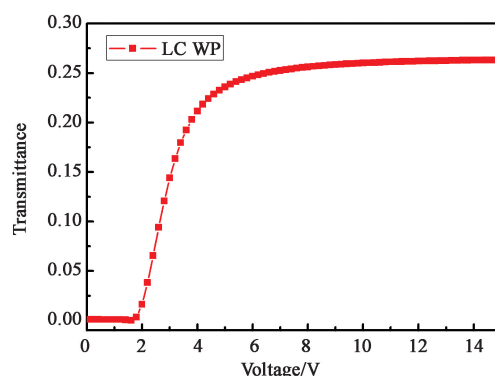


图 3 液晶半波片的电光曲线

Fig.3 Electric-optic curve of liquid crystal half-wave plate

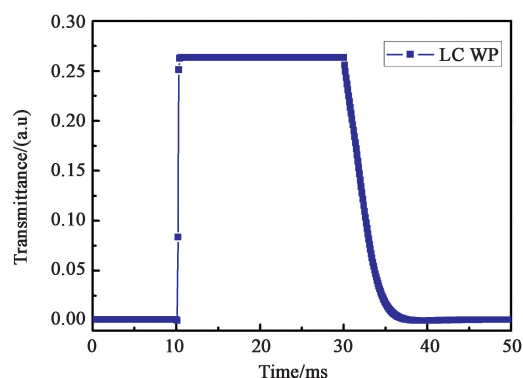


图 4 液晶半波片的响应时间

Fig.4 Response time of liquid crystal half-wave plate

3 消色差偏振光开关

为了实现偏振光开关的消色差效果,参考组合式消色差波片设计了由多片液晶波片组成的消色差偏振光开关。

3.1 两片式消色差偏振光开关

由两个液晶波片构成的消色差偏振光开关,其结构如图 5 所示。该偏振光开关中包括两个由液晶盒构成的半波片,按图中所示的 0° 方向,下液晶盒的液晶分子方位角为 67° ,上液晶盒的液晶分子方位角为 23° ,两液晶盒中液晶分子预倾角均为 2° ,两液晶盒同步驱动。对于该结构,在未驱动状态下,入射光经过起偏器后形成的偏振光在透过两个液晶半波片之后,偏振方向旋转 90° ,出射光应为偏振方向沿 90° 方向的线偏振光,在驱动状态下,液晶分子排列发生变化,在垂直与光线传播方向的平面内表现出折射率各向同性,液晶盒不能起到半波片的作用,偏振光的偏振方向不发生变化,出射光的偏振方向沿 0° 方向。

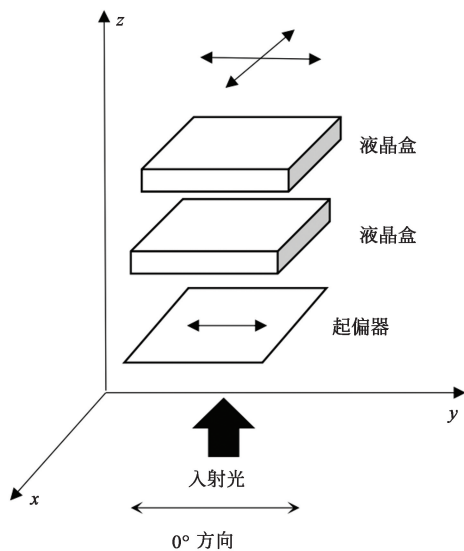


图 5 两个液晶波片的装置结构图

Fig.5 Device structure diagram of two liquid crystal wave-plates

使用 Tech Wiz LCD 1D 软件对该结构进行模拟,得到了在不加电压和施加 20 V 驱动电压情况下的偏振旋转特性,在未驱动状态下如图 6 所示,在驱动状态下如图 7 所示。可以看出在

驱动状态与未驱动状态下,都可以得到在全波长范围内在某一方偏振方向上具有较高透过率的线偏振光,并且透光状态和掩光状态的透过率曲线都很平缓,不会产生色差效果,相比于 TN 型消色差偏振光开关,不存在输出色彩的偏红或偏蓝的情况。进一步通过在不同驱动状态下偏振光在正交和平行偏光片下的透过率计算出两种状态下不同波长情况下的对比度,其结果如图 8 所示,可以看出,在未驱动状态下,出射光在 $480\sim 680$ nm 的可视波长范围内具有较高的对比度,在驱动状态下,出射光在大于 400 nm 的波长范围内具有大于 100 的对比度,但整体对比度较低,在 $100\sim 200$ 的范围内,此时各波段对比度接近。该结构的驱动电压以及响应时间与前文所述的单液晶波片一致。

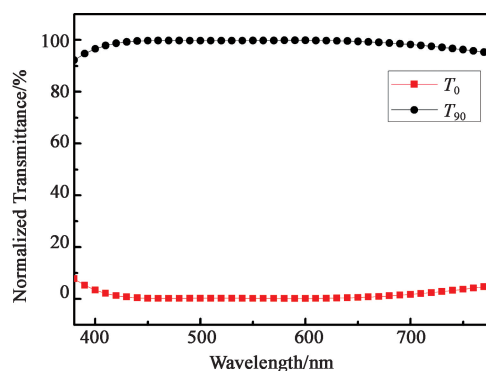


图 6 未驱动状态下两个液晶波片组合的偏振旋转特性

Fig.6 Polarization rotation effect of the two liquid crystal wave-plates without driving

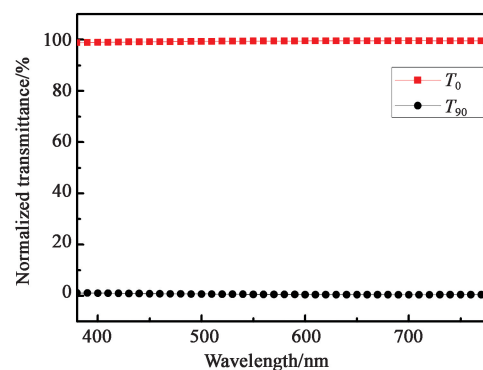


图 7 驱动状态下两个液晶波片组合的偏振旋转特性

Fig.7 Polarization rotation effect of the two liquid crystal wave-plates with driven voltage (20 V)

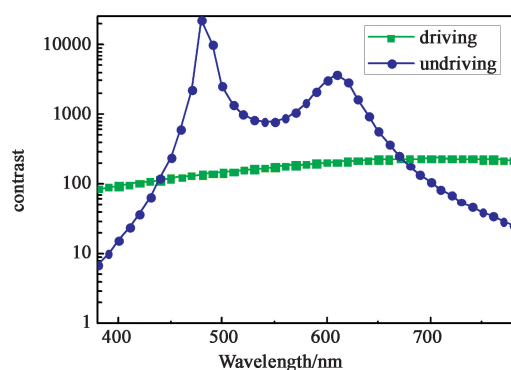


图8 驱动状态和未驱动状态下不同波长的对比度
Fig. 8 Contrast ratio vs. wavelength with and without driving

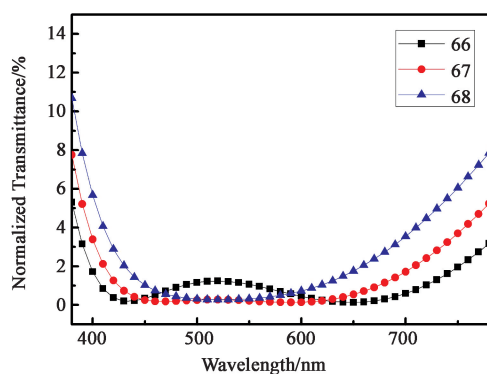


图9 液晶分子取向角对于透光率的影响
Fig. 9 Effect of rubbing angle of liquid crystal molecule on transmittance

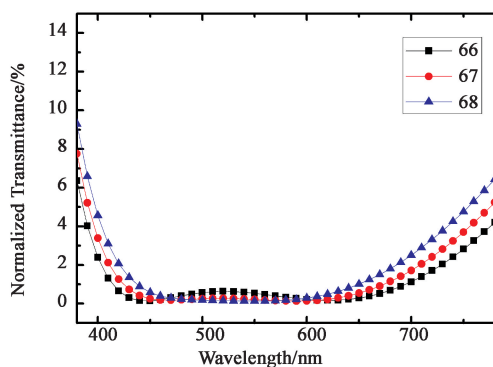


图10 液晶分子取向角对于透光率的影响
Fig. 10 Effect of rubbing angle of liquid crystal molecule on transmittance

在消色差波片的设计中,波片之间的角度有着严格的要求,在本文所述的液晶消色差波片中则表现为在液晶盒内液晶分子的取向角必须符合所设计的角度。在未驱动状态下,下液晶盒液晶

分子取向角对于 0° 方向偏振光透光率的影响如图所示,图9中,上液晶盒的液晶分子取向角与下液晶盒互余,图10中只改变下液晶盒中液晶分子的取向角。此时 90° 方向透光率与 0° 方向透光率和为100%。从图中可以看出,液晶分子取向角度的改变对于液晶消色差偏振光开关的偏振旋转特性在数值上有着一定的影响,但是这种影响是可以接受的。

3.2 三片式消色差偏振光开关

由3个液晶波片构成的消色差偏振光开关,其结构如图11所示。在该结构中,液晶盒内液晶分子方位角自下而上依次为 $78^\circ, 45^\circ, 12^\circ$,液晶分子预倾角均为 2° ,各液晶盒同步驱动。在该结构中,通过设置三片液晶波片来进一步优化其消色差效果,与两片式消色差偏振光开关相似,在未驱动状态下,入射光经过起偏器后形成的偏振光在透过三个液晶半波片之后,偏振方向变化 90° ,出射光应为偏振方向沿 90° 方向的线偏振光,在驱动状态下,液晶分子排列发生变化,在垂直与光线传播方向的平面内表现出折射率各向同性,液晶盒不能起到半波片的作用,偏振光的偏振方向不发生变化,出射光的偏振方向沿 0° 方向。

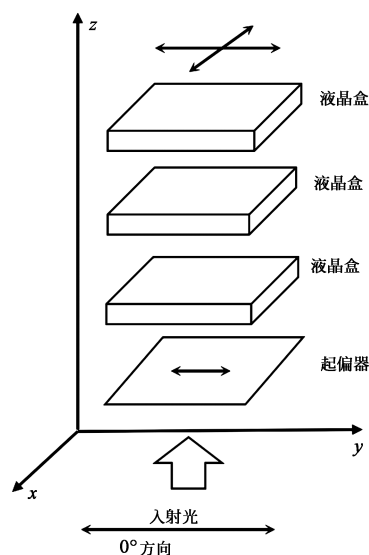


图11 三个液晶波片的装置结构图
Fig. 11 Device structure diagram of three liquid crystal wave-plates

使用 TechWiz LCD 1D 软件对该结构进行模拟,得到在不驱动和驱动电压为20 V情况下,正交和平行偏光片情况下的偏振光透过率,模拟结

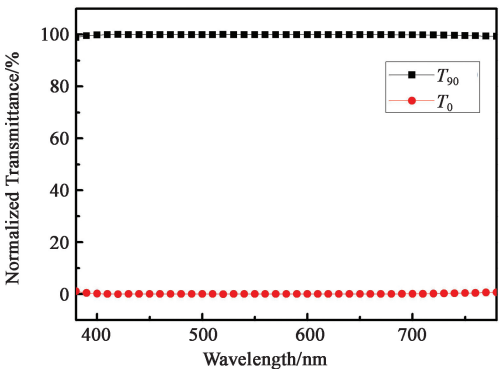


图 12 未驱动状态下两个液晶波片组合的偏振旋转特性

Fig.12 Polarization rotation effect of the two liquid crystal wave-plates without driving

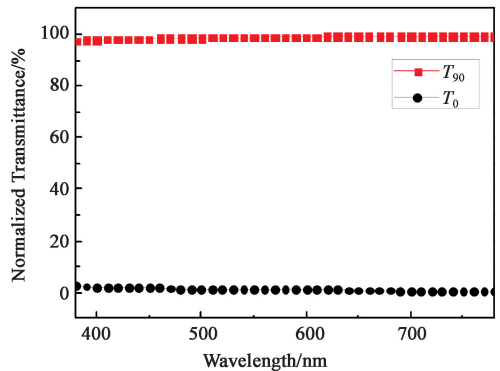


图 13 驱动状态下两个液晶波片组合的偏振旋转特性

Fig.13 Polarization rotation effect of the two liquid crystal wave-plates with driven voltage (20 V)

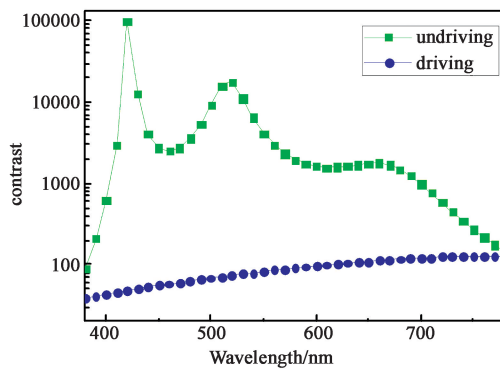


图 14 驱动状态和未驱动状态下不同波长的对比度

Fig.14 Contrast ratio vs. wavelength with and without driving

果如下,在未驱动状态下如图 12 所示,在驱动状

态下如图 13 所示。可以看出在驱动状态与未驱动状态下,都可以得到在全波长范围内在某一方偏振方向上具有较高透过率的线偏振光,且驱动状态下与未驱动状态下得到的偏振光方向夹角为 90° 。两种驱动状态所到的偏振光的对比度,如图 14 所示,可以看出:在未驱动状态下,出射光在全波长范围内具有较高的对比度,出射光在大于 390 nm 的波长范围内具大于 100 的对比度,在驱动状态下,出射光在大于 430 nm 的波长范围内具有高于 50 的对比度,在大于 620 nm 的波长范围内具有高于 100 的对比度,该结构的驱动电压以及响应时间与前文所述的单液晶波片一致。应用该结构可以在未驱动状态下输出具有极高对比度的偏振光,在驱动状态下,其输出光的对比度低于两片式液晶消色差波片,这可能是由于液晶波片数量的增多,导致液晶中剩余较多的双折射率,从而影响偏振旋转效果,还需要进一步进行优化处理。

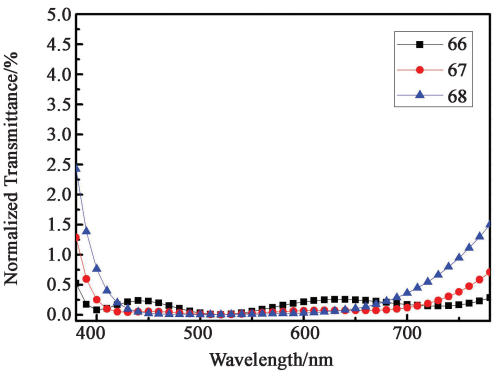


图 15 液晶分子取向角对于透光率的影响

Fig. 15 Effect of rubbing angle of liquid crystal molecule on transmittance

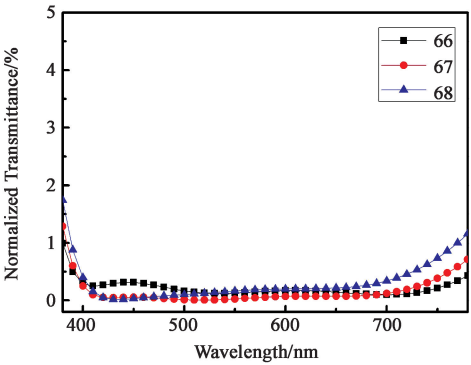


图 16 液晶分子取向角对于透光率的影响

Fig. 16 Effect of rubbing angle of liquid crystal molecule on transmittance

同样的,液晶分子取向角对于该装置的偏振光旋转特性也会产生影响,在未驱动状态下,中间液晶盒液晶分子取向角固定为 45° 下液晶盒液晶分子取向角对于 0° 方向偏振光透光率的影响如图所示,图15中,最上液晶盒的液晶分子取向角与最下液晶盒互余,图16中只改变下液晶盒中液晶分子的取向角。此时 90° 方向透光率与 0° 方向透光率和为100%。从图中可以看出,液晶分子取向角度的改变对于液晶消色差偏振光开关的偏振旋转特性在数值上有着一定的影响,但是这种影响是可以接受的。

4 结 论

本文中研究了液晶波片组成的偏振光光开

关的偏振旋转特性和响应特性。由液晶波片组成的偏振光开关可以实现消色差效果,其中两片式消色差偏振光开关可以实现未驱动状态下出射光在 $440\sim 690\text{ nm}$ 的波长范围内具有大于100的对比度,在驱动状态下,出射光在大于 400 nm 的波长范围内具大于100的对比度;三片式消色差偏振光开关可以实现出射光在大于 390 nm 的波长范围内具大于100的对比度,在大于 620 nm 的波长范围内具有高于100的对比度。两种结构的驱动电压均设置为 20 V ,响应时间上升 0.3 ms ,下降 4.5 ms ,且均可在可视光波长,即 $480\sim 680\text{ nm}$ 的波长范围内输出无色差偏振光,可以实现消色差偏振光开关的作用。

参 考 文 献:

- [1] 邓元勇,艾国祥,王敬山.高质量消色差波片的研制[J].天体物理学报,1993,13(3):283-290.
DENG Y Y, AI G X, WANG J S. The development of high-quality achromatic waveplate [J]. *Acta Astrophysica Sinica*, 1993, 13(3): 283-290. (in Chinese)
- [2] HARIHARAN P. Achromatic and apochromatic halfwave and quarterwave retarders [J]. *Optical Engineering*, 1996, 35(11): 3335-3337.
- [3] BECKERS J M. Achromatic linear retarders [J]. *Applied Optics*, 1971, 10(4): 973-975.
- [4] TITLE A M. Improvement of birefringent filters. 2: Achromatic waveplates [J]. *Applied Optics*, 1975, 14(1): 229-237.
- [5] PANCHARATNAM S. Achromatic combinations of birefringent plates: Part I. An achromatic circular polarizer [J]. *Proceedings of the Indian Academy of Sciences-Section A*, 1955, 41(4): 137-144.
- [6] SHARP G D, JOHNSON K M. A new RGB tunable filter technology [J]. *SPIE*, 1996, 2650: 98-105.
- [7] SHIKAMA S, UMENO D. Stereoscopic image projection apparatus and telecentric zoom lens: US, 5982538 [P]. 1999-11-09.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.

作者简介:张弛(1994—),男,河北保定人,硕士研究生,2016年于河北工业大学获得学士学位,主要从事液晶器件方面研究。E-mail: 1021416548@qq.com