

带有补偿膜的扭曲相列液晶宽带快速偏振光开关*

王琼华 成建波

(电子科技大学光电信息学院, 成都 610054)

摘要 提出了由一个扭曲相列液晶和两个单轴补偿膜构成的宽带偏振光开关, 采用共轭梯度法对该器件参数进行优化设计. 模拟结果表明此偏振光开关在整个可见光 400 ~ 700 nm 范围内, 具有高对比度的特征, 响应时间达到通常液晶显示器的水平.

关键词 偏振光开关; 扭曲相列液晶; 单轴补偿膜; 共轭梯度法; 琼斯矩阵

中图分类号 O43 **文献标识码** A

0 引言

偏振光开关是指线性偏振光通过该器件, 在不加电压, 即“关”时, 出射光转换为另一种偏振光; 在加电压, 即“开”时, 出射光偏振状态保持不变. 偏振光开关在彩色序列显示^[1]、偏振光三维立体显示^[2,3]以及光纤通讯^[4]等诸多领域有着广泛应用. 带宽宽、响应时间快、对比度高、阈值电压低、器件薄、轻以及成本低是偏振光开关的主要性能要求. 90°扭曲相列(TN; twist nematic)液晶是一个典型的宽带偏振光开关. 不施加电压时, 入射线性偏振光经过该液晶盒沿着液晶指向矢转动 90°, 从而转换为另一种偏振光; 施加大于液晶盒阈值电压的电压时, 液晶指向矢沿着电场方向取向, 入射光通过该液晶, 其偏振方向不变. TN 液晶的响应时间取决于液晶盒厚以及液晶的材料参数. 通常, 5 μm 的液晶盒的响应时间是 20 至 30 ms.

为了将 TN 盒设计为宽带偏振光开关, 盒厚和液晶材料的双折射率乘积($d\Delta n$)必须满足 Mauguin 极限, 即 $\lambda \ll \Delta n d$; 或者 Gooch-Tarry 第一最小条件 $d\Delta n = (\sqrt{3}/2)\lambda$ ^[5]. 为了满足 Mauguin 极限, 需要 $\Delta n d \sim 20\lambda$, 也就是说需要相当厚的液晶层; 然而较厚液晶层的响应时间较慢; 严格地讲, Gooch-Tarry 第一最小条件只在单个波长满足, 很难实现宽带要求. 因而开发具有快速响应时间的宽带偏振光开关, 必须突破上述常规设计.

文献[6]报告了采用基于 Poincare sphere 方法的三层液晶(两个均匀盒和一个 TN 盒)的线性偏振光转换器. 该器件除了带宽不够宽外, 其他性能都较好. 文献[7]采用优化设计方法设计出由 TN 液晶和两个单轴补偿膜构成的宽带线性偏振光转换器, 其性能优于文献[6]的设计. 然而这两种偏振

光转换器只用于转换入射光的偏振状态, 即只工作于不加电压一种工作状态, 只相当于偏振光开关的“关”状态, 不涉及施加电压的“开”状态的性能.

本文提出一种采用一个有源 TN 液晶和两个无源单轴(uniaxial)补偿膜构成的宽带偏转光开关. 无电压“关”时, 该器件就相当于线性偏振光转换器; 加电压“开”时, 该器件不改变光的偏振状态. 由于涉及“开”“关”两种状态, 特别是加电压的“开”状态, 其设计难度远远大于偏振光转换器. 为此, 我们将采用优化设计法, 使得该器件在整个可见光范围“开”“关”两种状态都具有良好工作性能, 即高对比度、快速响应时间和低阈值电压等.

1 工作原理

图 1 示出该宽带偏振光开关的器件结构(虚线框内)和工作原理. 为了阐述计算过程, 我们将该器件置于两个互相垂直的偏振片之间, 如图 1(a)所示. 当液晶盒在无电压工作时, 它将入射线性偏振光转动 90°角, 也就是说, 它将 p 光转换为 s 光, 或将 s 光转换为 p 光. 这样, 入射线性偏振光就通过检偏器射出, 其理想透射率为 1. 当液晶盒在高电压, 即所加电压超过阈值电压时, 液晶的指向矢沿着电场方向取向, 液晶盒不影响入射光的偏振状态, 因而入射线性偏振光不能通过检偏器而射出, 其理想透射率为 0.

当液晶盒上不加电压时, TN 液晶盒扭曲角为 ϕ , 我们用琼斯矩阵法来计算其透射光谱. 在高电压时, 液晶指向矢几乎沿着垂直于衬底表面的方向重新取向, 扭曲角几乎为零. 但是, 由于受较强基板表面锚定能的影响, 与基板接触的液晶层的指向矢保持不变. 因此我们首先采用连续弹性理论^[8]来计算指向矢分布, 然后再用琼斯矩阵法来计算透射光谱.

在图 1(b)所示的坐标系里, 我们定义 TN 盒的下基板摩擦方向为 0°, 起偏器的角度为 β , 检偏器与起偏器垂直, 即 $\delta = \frac{\pi}{2}$. 检偏器即输出光的偏振方向

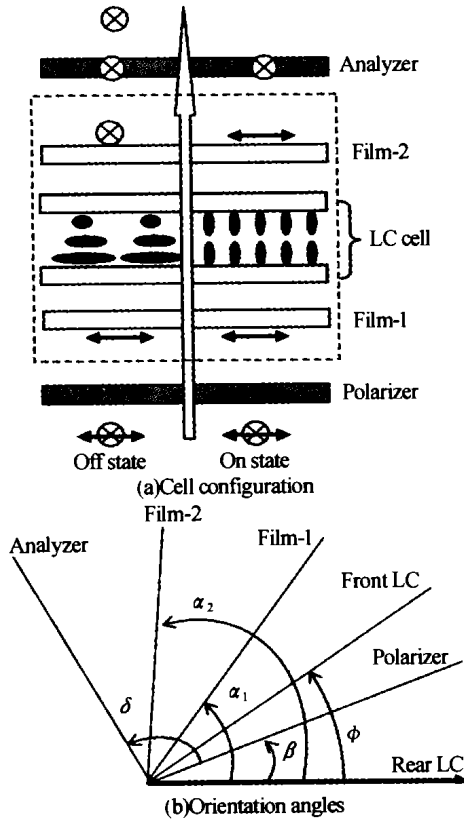


图1 宽带偏振光开关的器件结构和工作原理
Fig.1 The device configuration and operating principle of the broadband polarization switch

为 $r = \beta + \frac{\pi}{2}$, 两个单轴聚合物膜的光轴角度为 α_1 和 α_2 , 膜厚分别为 d_1 和 d_2 . 在模拟中, 我们只计算该偏振光开关的归一化透射光谱, 而忽略由起偏器、检偏器、补偿膜以及基板所产生的吸收和反射.

角度为 $r = \beta + \frac{\pi}{2}$ 的线性偏振光的归一化透射光谱可以由琼斯矩阵^[7]得到

$$T = \left| \begin{bmatrix} \cos \gamma & \sin \gamma \end{bmatrix} M_{\text{film2}} M_{\text{LC}} M_{\text{film1}} \begin{bmatrix} \cos \beta \\ \sin \beta \end{bmatrix} \right|^2 \quad (1)$$

式中

$$M_{\text{LC}} = \begin{bmatrix} \cos \phi & -\sin \phi \\ \sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \cos X - i(\Gamma/2) (\sin X/X) & \phi (\sin X/X) \\ -\phi (\sin X/X) & \cos X + i(\Gamma/2) (\sin X/X) \end{bmatrix}$$

$$M_{\text{film1}} = \begin{bmatrix} \cos \alpha_1 & -\sin \alpha_1 \\ \sin \alpha_1 & \cos \alpha_1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \exp(-i\pi d_1 \Delta n_{\text{film}}/\lambda) & 0 \\ 0 & \exp(i\pi d_1 \Delta n_{\text{film}}/\lambda) \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \cos \alpha_1 & \sin \alpha_1 \\ -\sin \alpha_1 & \cos \alpha_1 \end{bmatrix}$$

$$M_{\text{film2}} = \begin{bmatrix} \cos \alpha_2 & -\sin \alpha_2 \\ \sin \alpha_2 & \cos \alpha_2 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \exp(-i\pi d_2 \Delta n_{\text{film}}/\lambda) & 0 \\ 0 & \exp(i\pi d_2 \Delta n_{\text{film}}/\lambda) \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \cos \alpha_2 & \sin \alpha_2 \\ -\sin \alpha_2 & \cos \alpha_2 \end{bmatrix}$$

这里, $X = \sqrt{\phi^2 + (\Gamma/2)^2}$ 以及 $\Gamma = 2\pi d \Delta n/\lambda$.

在我们的设计里, 考虑了液晶以及聚合物材料的折射率色散特性^[9]

$$n_e = A_e + \frac{B_e}{\lambda^2} \quad (2a)$$

$$n_o = B_o + \frac{B_o}{\lambda^2} \quad (2b)$$

在式(2)中, A_e, B_e, A_o 以 B_o 是拟合参数. 对于模拟采用Merk公司的E7液晶来说, 得到 $A_e = 1.6718, B_e = 24460.2 \text{ nm}^2, A_o = 1.4983, B_o = 8612.6 \text{ nm}^2, n_e = 1.7527, n_o = 1.5268$, 以及在 $\lambda = 550 \text{ nm}$ 时, $\Delta n = 0.2259$. 假如单轴补偿膜采用由聚碳酸酯, 则 $n_e = 1.5856, n_o = 1.5569, \Delta n = 0.0287$. 因而得到聚碳酸酯膜的拟合参数为 $A_e = 1.5637, B_e = 6624.8 \text{ nm}^2, A_o = 1.5367, B_o = 6110.4 \text{ nm}^2$.

在优化时, 其价值函数为

$$\text{cost} = - \int_{400\text{nm}}^{700\text{nm}} T(\lambda) d\lambda \quad (3)$$

我们使偏振光开关在“开”和“关”两种状态时都满足该函数最小, 从而搜索器件结构参数 $\beta, \phi, \alpha_1, \alpha_2, d, d_1$ 以及 d_2 的最优值. 该优化方法叫共轭梯度法^[10].

2 结果与讨论

以Merk E7液晶材料模拟优化计算. E7的参数为: $\epsilon_{\parallel} = 19.6, \epsilon_{\perp} = 5.1, k_{11} = 12 \text{ pN}, k_{22} = 9 \text{ pN}, k_{33} = 15.5 \text{ pN}$ 以及 $\text{Pitch} = 300 \mu\text{m}$. 液晶盒上下基板预倾角为 3° . 采用共轭梯度优化法计算, 得到该TN盒的最优值为: $\phi = 90.12^\circ, d = 6.20 \text{ nm}$ 以及 $\beta = 1.64^\circ$; 补偿膜的最优值为: $\alpha_1 = 89.96^\circ, \alpha_2 = -89.91^\circ$, 厚度 $d_1 = 45.29 \text{ nm}, d_2 = 4.83 \text{ nm}$. 图2示出该偏振光开关在波长分别为 $\lambda = 650, 550$ 以及 450 nm 时透射率-电压曲线. 由此可见, 该器件的色散较小, 阈值电压较低, 约 $3.5 V_{\text{rms}}$.

同时计算了该偏振光开关在电压 $V = 0$ 和 $V = 5V_{\text{rms}}$ 时其透射率-波长关系曲线, 如图3中实线所示. 从图中可以看出, 该偏振光开关在整个可见光带宽 $400 \sim 700 \text{ nm}$ 范围内, 具有很好的“开”和“关”特性, 具有高对比度. 在实际使用时, 图1的检偏器是不需要的. 因此, 该偏振光开关在无工作电压时, 透射s光, 在有工作电压时, 透射p光, 反之亦然.

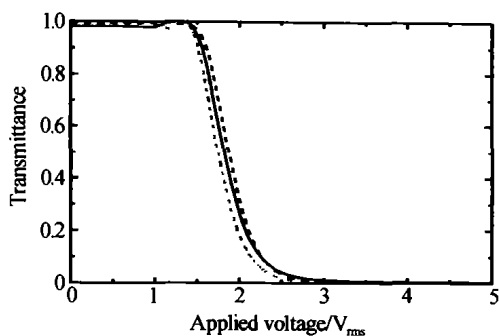


图2 宽带偏振光开关在波长分别为 $\lambda = 650$ (点线), 550 (实线) 以及 450 nm (虚线) 时透射率-电压曲线

Fig. 2 The simulated voltage-dependent transmittance of the polarization switch at $\lambda = 650$ nm (dotted line), $\lambda = 550$ nm (solid line) and $\lambda = 450$ nm (dashed line). The parameters used for simulations are listed in the text

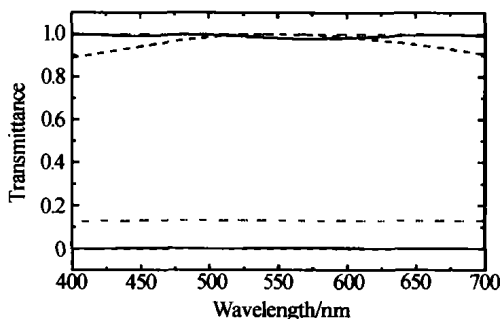


图3 宽带偏振光开关(实线)与 Gooch-Tarry 90° TN 液晶(虚线)以及宽带偏振光转换器(点线)的计算结果比较. 上部曲线为 $V=0$ 时, 下部曲线为 $V=5 V_{ms}$ 时

Fig. 3 The simulated transmission spectra of the proposed polarization switch (solid lines), Gooch-Tarry 90° TN LC cell (dashed lines) and a broadband polarization rotator (dotted lines) between crossed polarizers. Upper curves: $V=0$ and lower curves: $V=5 V_{ms}$

图3给出了 Gooch-Tarry 90° TN 液晶(虚线)以及宽带偏振光转换器(点线)的计算结果,以便进行比较. 正如所预计的, Gooch-Tarry TN 液晶在无电压 $\lambda = 550$ nm 时,透射率 $T = 1$,但是在 $\lambda = 400$ nm 和 700 nm 时, T 逐渐下降到 0.9 . 这意味着出射偏振光不纯. 另一方面, 90° TN 偏振光转换器具有相当好的无电压“关”状态透射率-波长关系曲线,但有电压“开”时,存在 12% 的漏光率,即出射偏振光不纯. 因此,该偏振光转换器只适合于工作于无电压时变换入射光的偏振状态. 相反,设计的宽带偏振光开关在无电压时透射率大于 97.8% ,在有电压时也只有很小的漏光率,小于 0.35% .

在设计示范例子中使用了 E7 液晶材料,其 $\Delta n = 0.226$,因而液晶的盒厚为 $d = 6.20 \mu\text{m}$. 其响应时间为 35 ms,为了提高响应时间,需更薄的

液晶盒厚,可以采用更高双折射率 Δn 值的液晶材料. 现在已经开发出高 Δn 低粘质系数的几种液晶材料^[11];例如:如果选取 $\Delta n = 0.3$,液晶盒可降到 $d = 4.67 \mu\text{m}$,其响应时间可在 $20 \sim 30$ ms 范围,达到普通液晶显示器的技术水平.

3 结论

提出了由一个有源 TN 液晶盒和两个无源单轴补偿膜构成的宽带偏振光开关. 我们采用共轭梯度法来优化该器件参数,获得了 $400 \sim 700$ nm 整个可见光范围高对比度. 其响应时间取决于所用液晶材料和盒厚. 对于常规 Δn 值的液晶材料,响应时间达到目前液晶显示的技术水平.

参考文献

- 1 Sharp G D, Johnson K M. A new RGB tunable filter technology. *Proc SPIE*, 1996, **2650**: 98 ~ 105
- 2 Shikama S, Umeno D. Optical polarization switch and method of using same. US Patent, 5982538. 1999
- 3 林远芳,刘向东,刘旭. 基于二维旋转屏的体三维显示系统像素属性分析. *光子学报*, 2004, **33**(4): 476 ~ 480
Lin Y F, Liu X D, Liu X. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(4): 476 ~ 480
- 4 Barnes W L. 2×2 optical fibre polarization switch and polarization controller. *Electron Lett*, 1988, **24**(23): 14287 ~ 1429
- 5 刘永智,杨开愚. 液晶显示技术. 成都:电子科技大学出版社,2000
Liu Y Z, Yang K Y. Liquid crystal display technology, Chengdu: Press of University of Electronic Science and Technology of China, 2000
- 6 Zhuang Z, Kim Y, Patel J S. Achromatic linear polarization rotator using twisted nematic liquid crystals. *Appl Phys Lett*, 2000, **76**(26): 3995 ~ 3997
- 7 Wu T X, Huang Y, Wu S T. Design optimization of broadband linear polarization converter using twisted nematic liquid crystal. *Jpn J App Phys*, 2003, **42**(1): L39 ~ 41
- 8 Gennes P G, Prost J. The Physics of Liquid Crystals. 2nd Ed. Clarendon: Oxford, 1993
- 9 Wu S T. Optics and nonlinear optics of liquid crystal. Singapore: World scientific publishing Co LTD, 1997
- 10 Axelsson O. Iterative Solution Methods. Cambridge University Press, 1996
- 11 Wu S T, Yang D K. Reflective Liquid Crystal Displays. New York: Wiley, 2001

An Achromatic Twisted Nematic Liquid Crystal Polarization Switch with a Compensated Film

Wang Qionghua, Cheng Jianbo

School of Opto-electronic Information, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054

Received date: 2004-05-08

Abstract A broadband polarization switch consisting of an active twisted nematic liquid crystal cell and two passive uniaxial compensation films is proposed. The conjugate gradient method was used for optimizing the device parameters. Simulation results indicate that the polarization switch exhibits a broad bandwidth with 400 ~ 700 nm, high contrast ratio and fast response time with 20 ~ 30 ms.

Keywords Polarization switch; Twisted liquid crystal; Uniaxial compensation film; Conjugate gradient method; Jones matrix



Wang Qionghua was born in 1969 in Sichuan province. She was a post-doctorate research fellow in the School of Optics/CREOL, University of Central Florida in 2001-2004, and she is an associate professor in the School of Opto-electronic Information, University of Electronic Science and Technology of China (UESTC). She received her M. S. and Ph. D. degrees in opto-electronics and optical engineering from UESTC in 1995 and 2001, respectively. She has coauthored near thirty papers on display devices and systems. Her recent research interests include CRT projection displays, liquid crystal displays, 3D display and OLEDs.