

doi: 10.3788/gzxb20144304.0426002

电控液晶光阀中的指向矢分布特性

祁建霞

(西安邮电大学 理学院, 西安 710121)

摘 要:液晶分子具有介电和光学各向异性,在外电场作用下,液晶指向矢将会重新分布,具有高效的光学相位调制能力.本文从实验和理论角度对电控液晶光阀的光学调制特性进行了研究,结果表明:光阀阈值电压约为 4V,且当外加电压高于阈值电压时,液晶光阀的透射强度随外加电压表现出非周期性特性.根据液晶连续体弹性理论,对电场作用下液晶光阀的指向矢分布特性进行数值分析,分析结果表明液晶光阀对透射光强的非周期调制特性取决于液晶体系的偏转状态,为研究液晶的偏振光调制特性提供理论依据及实验基础.

关键词:液晶;光学各向异性;偏振;电光特性;数值计算

中图分类号:O753+.2

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2014)04-0426002-4

Deflect Characteristics of Liquid Crystal Module Under Electric Field

QI Jian-xia

(School of Science, Xi'an University of Posts and Telecommunications, Xi'an 710121, China)

Abstract: Liquid crystals with dielectric and optical anisotropy have the ability of optical phase efficient modulation. When the liquid crystal system is placed in external electric field, the director of liquid crystal system will be redistributed. In this paper, the optical modulated effect of electronically controlled liquid crystal light valve was studied experimentally and theoretically. The result shows that threshold voltage of light valve is about 4 volts. And when external voltage is higher than the threshold voltage, the transmitted intensity of liquid crystal light valve will present the aperiodic properties. According to the continuum elasticity theory model, the liquid crystal director distributions in the electric field were studied by numerical methods, and found that the aperiodic modulation of transmitted intensity is depending on the distribution of the liquid crystal directors critically. It is the theoretical and experimental basis for the study of polarization-modulation characteristics.

Key words: Liquid crystals; Optical anisotropy; Polarization; Electro-optical effects; Numerical methods

OCIS Codes: 260.5430; 160.3710; 160.2100

0 引言

液晶分子具有奇特的电学、磁学特性^[1-2],及光学各向异性,能够产生光学双折射、布喇格反射、衍射及旋光效应,具有良好的光学调制特性^[3-6].由于液晶分子在外电场作用下的重新分布特性可以实现对入射光波的相位调制,因此液晶材料广泛地应用于液晶显示、空间相位调制和光信息处理等领域^[7-8].2012年,Lin等人研究了填充聚合网格液晶的90°扭曲液晶盒的偏转无关相位调制器,在30 V_{rms}条件下,得到了0.28π的

相位平移^[11].Yankova课题组利用EPR及UV-vis法对处于定向排列的5CB液晶体系中的定向客体分子进行了研究^[12].范志新等基于聚合物分散液晶和应变液晶特性制备出一种特殊的应力显示玻璃^[13].近年来,关于液晶光子晶体负折射特性的研究也得到人们关注^[14].

由此可知,液晶器件所表现出的良好光学调制能力,在多个学科领域都具有广泛的应用,具有十分重要的研究意义.研究表明,液晶器件的光学调制能力主要归功于液晶分子的电光效应^[2],即处于电场中的液晶

基金项目:陕西省自然科学基金(No. 2013JM1009)和西安邮电大学中青年基金(No. ZL2013-37)资助

第一作者:祁建霞(1980-)女,讲师,硕士,主要研究方向为光信息处理技术. Email:qjianxia@xupt.edu.cn

收稿日期:2013-01-01;录用日期:2013-10-12

<http://www.photon.ac.cn>

分子的电控偏转特性. 本文系统研究了电控液晶光阀中的液晶分子指向矢的分布特性, 理论上基于液晶连续体弹性模型, 根据差分法数值方法, 分析液晶指向矢的偏转特性. 实验上对液晶光阀的电光特性进行研究, 并基于指向矢的分布特性, 对液晶光阀所非周期性电光特性进行解释, 为更好的研究偏振光调制器提供理论基础.

1 实验

1.1 实验装置

实验中使用的激光器为 He-Ne 激光器, 功率为 20 mW, 波长为 632.8 nm; 液晶光阀内液晶分子为垂直排列状态; 起偏器与检偏器的消偏比为 500 : 1, 二者透振方向为正交分布; 液晶光阀两端提供加载电压的电压控制器及激光功率计均为实验室自制设备, 且通过标准器件校对, 能够满足实验要求. 液晶光阀的具体构型为: 液晶盒由上下两片导电玻璃制成, 盒内充有液晶, 四周密封. 液晶盒厚一般为 5~8 μm , 上下玻璃片内侧镀有显示电极, 使外部电信号通过电极加到液晶上. 上下玻璃基板内侧覆盖着一薄层高分子有机物定向层, 可使棒状液晶分子垂直于玻璃表面, 沿定向处理的方向排列^[15].

1.2 实验过程

利用激光器输出波长为 632.8 nm 的连续激光, 起偏器的透振方向为垂直方向, 因此激光经过起偏器 P_1 后, 其偏振态为垂直方向振动; 然后沿着液晶光阀玻璃基板的法线方向穿过液晶盒, 经过检偏器 P_2 , 其透振方向与 P_1 正交. 具体实验原理如图 1.

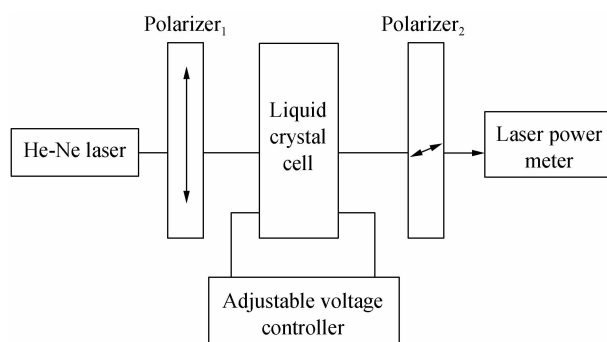


图 1 实验装置原理

Fig. 1 Experimental setup

2 结果与讨论

2.1 实验结果

实验中保持激光偏振态及功率不变, 从零开始, 逐渐增加液晶光阀两端的加载电压值, 并记录激光功率计所接收的激光强度, 结果如图 2.

从图 2 可以看出, 液晶光阀与外加电压之间的变化关系: 1) 当加载电压小于阈值电压时, 液晶光阀的透

光强度为零; 2) 当超过阈值电压时, 透光强度呈现先逐渐增大, 后减小趋势; 3) 透光强度随着电压变化呈周期性振荡变化趋势, 但周期长度不相同.

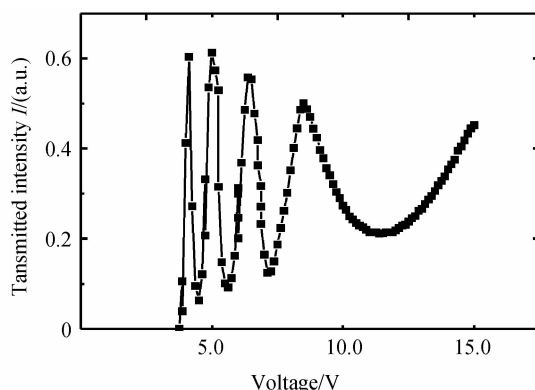


图 2 液晶光阀透光强度与加载电压之间关系

Fig. 2 The relationship between the transmitted intensity and applied voltage

2.2 讨论与分析

由于边界锚定作用^[3], 当外加电场小于阈值电场时, 液晶光阀内部的液晶分子平行于玻璃基板呈垂直排列分布. 入射偏振光的偏振方向与液晶分子长轴方向正交, 光波传播方向与液晶分子长轴方向保持一致, 即光波沿着光轴方向传播. 此时液晶光阀体现出光学各向同性, 对入射光波偏振态没有任何调制作用, 光波保持原有偏转状态不变. 由于与检偏器的透振方向正交, 因此光波被完全阻断. 外加电场超过阈值电压时, 继续增加会使光阀内部的液晶分子在电场作用下, 发生垂面向沿面偏转, 即光轴发生偏振, 则液晶体系体现出光学各向异性.

由于电场相干长度的存在^[16], 边界锚定作用对距离基板不同距离处液晶分子的锚定作用是不相同的, 且距离玻璃基板越远, 锚定作用越小. 即位于中央处的液晶分子受到边界锚定作用力最小, 而位于外场作用下的偏转最自由. 因此, 超过阈值电压时, 中央处的液晶分子最先发生偏转. 由图 2 可知, 实验所用液晶光阀的阈值电压为 4 V. 当电场增加到最大值后, 液晶盒内部除了靠近两玻璃基板处的液晶分子保持原有取向, 其他位置的液晶分子与外电场方向呈垂直排列, 即为沿面排列状态.

阈值电压满足公式^[16]

$$U_{th} = \pi \sqrt{k_{33} / |\epsilon_{//} - \epsilon_{\perp}|} \quad (1)$$

式中, k_{33} 为液晶分子的弯曲弹性常量, $\epsilon_{//}$ 和 ϵ_{\perp} 分别为液晶分子的介电常量的平行分量和垂直分量.

液晶光阀的透射光强度与驱动电压之间关系满足^[16]

$$I = I_0 \sin^2 \beta \sin^2 \frac{\rho \Delta n(U) d}{\lambda} \quad (2)$$

式中, I_0 是入射偏振光的强度, β 是入射偏转光的方向

与液晶光阀内寻常光的振动方向的夹角; d 和 $\Delta n(U)$ 分别表示盒厚和施加电压 U 时的折射率差; λ 表示入射光波长.

由式(2)可知,液晶光阀的透射强度与施加电压之间具有周期函数关系.随着液晶光阀两端的施加电压值增大,液晶光阀的透射强度变化为周期性振荡.

2.3 数值仿真

对于介电各向异性为负的液晶材料而言,液晶指向矢与电场方向垂直排列.处于液晶光阀中的液晶分子同时受到外电场施加的转矩和边界锚定力.在平衡状态下,两个转矩的影响互相抵消,液晶分子保持原有排列状态不变.当电场强度超过一定的阈值时,边界锚定力不足以抗衡外电场所施加的力,则液晶分子趋向于外电场方向.由液晶连续体弹性理论可知,液晶的自由能可表示为^[3]

$$G = \frac{1}{2} \int_{-d/2}^{+d/2} k_{11} (\nabla \cdot \mathbf{n})^2 + \frac{1}{2} k_{22} (\mathbf{n} \cdot \nabla \times \mathbf{n})^2 + \frac{1}{2} k_{33} (\mathbf{n} \times \nabla \times \mathbf{n})^2 - \Delta \epsilon (\mathbf{n} \cdot \mathbf{E})^2 dz \quad (3)$$

式中, k_{11} 、 k_{22} 分别表示展曲、扭曲弹性系数; \mathbf{n} 为液晶指向矢, \mathbf{E} 为电场强度; $\Delta \epsilon = |\epsilon_{//} - \epsilon_{\perp}|$.

从物理上讲,外电场促进指向矢定向排列,而形变则破坏指向矢的定向排列.

将坐标原点取在两块基板的中央,取 z 轴与玻璃基板表面垂直,而玻璃基板上液晶指向矢的方向与 z 轴平行,如图3所示,在垂直于玻璃基板的 z 轴方向加电场 E ,则液晶分子将沿玻璃基板法线方向排列.

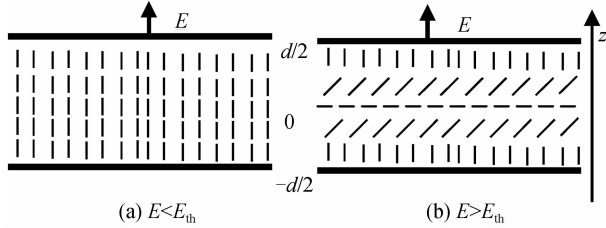


图3 液晶指向矢分布示意图

Fig. 3 The distribution of the liquid crystal director

则指向矢分量可表示为

$$\begin{aligned} n_x &= \cos \theta(z), n_y = 0, n_z = \sin \theta(z); \\ E_x &= 0, E_y = 0, E_z = E \end{aligned} \quad (4)$$

联合式(3)~(4)可得单位面积上液晶自由能表达式为

$$G = \frac{1}{2} \int_{-d/2}^{+d/2} \left[(k_{11} \cos^2 \theta + k_{22} \sin^2 \theta) \left(\frac{d\theta}{dz} \right)^2 - \Delta \epsilon E^2 \sin^2 \theta \right] dz \quad (5)$$

分析式(5)可知,此情形下没有扭曲弹性形变变化.利用欧拉最小值方程可求解外电场作用下,液晶体系自由能的最小值,然后利用差分法求解液晶在不同电场驱动下,指向矢随 z 轴的排列情况.

根据液晶连续体弹性形变理论,在外加电场作用下,液晶体系通过形变,使得液晶吉布斯自由能趋向最小值,而达到新的平衡态.将式(5)所得的指向矢方程通过变分法,带入欧拉方程中,可以得到一组非线性偏微分方程^[17]

$$\begin{cases} 2f(\theta) \frac{d^2 \theta}{dz^2} + f'(\theta) \frac{d^2 \theta}{dz^2} - g' \frac{d^2 \varphi}{dz^2} - 4k_{22} q_0 \cos \theta \cdot \\ \sin \theta \frac{d\varphi}{dz} + 2 \left| \frac{dU}{dz} \right|^2 \Delta \epsilon \cos \theta \sin \theta = 0 \\ \frac{d^2 U}{dz^2} (\epsilon_{//} \sin^2 \theta + \epsilon_{\perp} \cos^2 \theta) + 2 \frac{dU}{dz} \Delta \epsilon \cos \theta \cdot \\ \sin \theta \frac{d\theta}{dz} = 0 \end{cases} \quad (6)$$

式中, θ 、 φ 分别为液晶指向矢的倾角和扭曲角; q_0 为液晶分子旋转螺距.

采用中心差分法对式(6)进行处理,且选取未加电压时的指向矢分布作为求解方程组的初始值,通过Matlab编程,可以求解出液晶指向矢在外加电场下的液晶指向矢的一维空间分布.

图4为不同驱动电压条件下,液晶光阀内部液晶分子的倾角随距离液晶基板位置的变化关系曲线.横轴表示液晶分子距离液晶光阀下玻璃基板的距离,纵轴表示液晶分子的倾角变化;液晶分子倾角随距离变化具有以下规律:随着驱动电压增大,液晶分子倾角也随着增加,且位于液晶光阀中央处液晶分子的倾角变化最大.

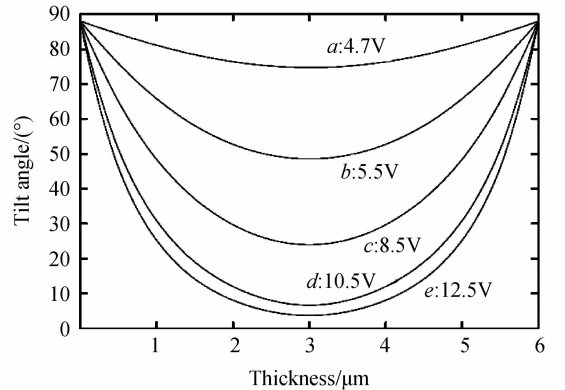


图4 不同电场下液晶分子倾角与液晶分子所处位置之间的关系

Fig. 4 The relationship between the tilt angle of LC molecules and position with varied applied voltage

由图4可知,当外加电压小于阈值电压时,液晶光阀内部液晶分子保持原有垂直排列状态,因此液晶光阀对入射光波的偏振态没有调制作用,经过正交放置的偏振偏片后,光强为零;当外加电压值增至阈值电压后,距离玻璃基板中央处的液晶分子率先发生偏转,如图4中曲线a所示;继续增大驱动电压,液晶盒内部发生电控偏转的液晶分子比例越来越大,液晶分子指向矢的偏转,意味着光轴方向发生偏转,则液晶光阀所具

有光学相位调制能力也在增强. 当施加电压增加到一定程度时, 液晶盒内部大部分液晶分子都已经按照外电场要求排列方向进行偏转, 此时再增加电压值, 能够偏转的液晶分子数目和偏转空间已经很小, 与刚超过阈值电压时相比, 此时的液晶光阀的相位调制能力已经下降, 如图 4 中曲线 d 和 e 所示. 所以, 需要改变较大范围的驱动电压, 才能实现一个周期的相位调制, 这就解释了图 2 中的光强随电压的非等周期变化趋势.

3 结 论

本文对垂面排列型液晶光阀的电光特性进行了研究, 并根据连续体弹性理论模型, 利用差分方法, 数值模拟了电场作用下液晶指向矢的偏转特性, 很好地解释了垂面排列液晶光阀的光学调制现象, 可以为制备具有高效相位调制特性的液晶光学调制器提供理论依据.

参 考 文 献

- [1] 立花太郎等著, 谈漫琪, 丁学泉译. 液晶知识[M]. 北京: 科学普及出版社, 1984: 165-173.
- [2] 谢毓章. 液晶物理学[M]. 北京: 科学出版社, 1998.
- [3] REN Guang-jun, YAO Jian-quan, LI Guo-hua, *et al.* A study of magnetism controlled polarization of liquid crystal[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(1): 152-155.
任广军, 姚建铨, 李国华, 等. 液晶磁控偏光特性的研究[J]. 光子学报, 2007, **36**(1): 152-155.
- [4] WANG Qian, HE Sai-ling. Optical calculation for reflective liquid crystal display[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2001, **30**(4): 410-417.
王谦, 何赛灵. 反射式液晶显示光学的理论计算[J]. 光子学报, 2001, **30**(4): 410-417.
- [5] VITORIANO C. Acousto-optic effect in nematic liquid crystals: Experimental evidence of an elastic regime [J]. *Physical Review E*, 2013, **88**(3): 032501.
- [6] YANG Y C, YANG D K. Electro-optic Kerr effect in polymer-stabilized isotropic liquid crystals [J]. *Applied Physics Letters*, 2011, **98**: 023502.
- [7] CHEN H S, AND LIN Y H. An endoscopic system adopting a liquid crystal lens with an electrically tunable depth-of-field [J]. *Optics Express*, 2013, **21**(15): 18079-18088.
- [8] TSOU Y S, LIN Y H, WEI A C. A concentrating photovoltaic system using an electrically tunable concentration ratio of a liquid crystal lens[J]. *Photonics Technology Letters*, 2012, **24**(24): 2239-2242.
- [9] DONG Jun. The study of the deflect characteristics of liquid crystal director under magnetic field[J]. *Science Technology and Engineering*, 2012, **12**(14): 3428-3431.
董军. 磁场调制下液晶指向矢偏转特性的研究[J]. 科学技术与工程, 2012, **12**(14): 3428-3431.
- [10] MOU Fang-di, LI Jun, HUANG Zi-qiang. Molecule directions two-dimensional distribution simulation and characteristics research of liquid-crystal blazed grating[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2013, **28**(1): 76-81.
牟芳氏, 李君, 黄子强. 液晶闪耀光栅中的指向矢二维分布与特性研究[J]. 液晶与显示, 2013, **28**(1): 76-81.
- [11] LIN Y H, CHEN M S, LIN W C, *et al.* A polarization-independent liquid crystal phase modulation using polymer-network liquid crystals in a 90° twisted cell[J]. *Journal of Applied Physics*, 2012, **112**: 024505.
- [12] YANKOVA T S, CHUMAKOVA N A, POMOGAILO D A, *et al.* Orientational order of guest molecules in aligned liquid crystal as measured by EPR and UV-vis techniques[J]. *Liquid Crystals*, 2013, **40**(8): 1135-1145.
- [13] FAN Zhi-xin, YANG Yu-ying, GAO Pan. Display of stressed liquid crystal light tunable glass[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystal and Displays*, 2012, **27**(5): 618-621.
范志新, 杨宇婴, 高攀, 等. 应变液晶调光玻璃显示[J]. 液晶与显示, 2012, **27**(5): 618-621.
- [14] YANG Ming-wei, XIAO Jun, LI Rui. Tunable Negative refraction photonic crystals filled with liquid crystals[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, **42**(2): 176-180.
杨明玮, 肖峻, 李锐. 液晶光子晶体的负折射特性研究[J]. 光子学报, 2013, **42**(2): 176-180.
- [15] 范志新. 液晶器件及工艺基础[M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 2002.
- [16] 黄子强. 液晶显示原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2004.
- [17] WANG Qian, HE Sailing. Simulation and comparison study of liquid crystal director distribution [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2001, **30**(5): 926-932.
王谦, 何赛灵. 液晶指向矢分布的模拟和比较研究[J]. 物理学报, 2001, **50**(5): 926-932.