

# 液晶磁控偏光特性的研究\*

任广军<sup>1,3</sup> 姚建铨<sup>1,3</sup> 李国华<sup>2</sup> 王 鹏<sup>1,3</sup>

(1 天津大学精密仪器与光电子工程学院,激光与光电子研究所,天津 300072)

(2 曲阜师范大学激光研究所,山东曲阜 273165)

(3 天津大学光电信息科学技术教育部重点实验室,天津 300072)

**摘 要** 利用偏光干涉理论,通过对 BL-009 型向列相液晶透射比的测试,分析了液晶透射比随磁场的变化情况,并对液晶的磁控双折射效应进行了研究. 实验在室温 20℃ 下用 JG-3 型连续可调磁场仪对液晶盒施加垂直于其表面的磁场,用 CT5A 型特斯拉计准确读出磁场强度数值,使液晶盒光轴方向与起偏镜和检偏镜偏振方向成 45°,分别测出了起偏镜和检偏镜偏振方向平行和垂直时的透射光强度. 通过数学函数拟合,得出了液晶的双折射率随磁场的变化规律,即:当磁场强度大于液晶的阈值磁场时,拟合函数能很好地描述液晶磁控双折射率的变化规律.

**关键词** 液晶;磁控;双折射;偏光

**中图分类号** O753<sup>+</sup>.2

**文献标识码** A

**文章编号** 1004-4213(2007)01-0152-4

## 0 引言

液晶是一种各向异性的物质,一般的情况下,光轴与分子的长轴方向一致,光学性质类似单轴晶体. 当对液晶盒加上外部磁场时,由于在不同的磁场强度作用下,会使分子的长轴发生一个不同的倾角旋转. 因此在这种状态时,液晶盒的光轴与未加磁场前不同,双折射率也会受磁场影响,这就是液晶的磁控双折射效应. 利用这一性质可以制成光偏转器和光调制器. 目前国内外对液晶的研究主要集中于液晶应用,而对于液晶的双折射效应研究的不多,特别是,对外加磁场作用下液晶双折射效应的研究还未见报道<sup>[1-2,4]</sup>. 本文通过对磁场作用下液晶透射比的测试,研究了液晶的磁控双折射效应;得出了液晶磁控双折射率的变化规律,所得结论为新型偏光器件的设计与制作提供了依据,也为更深入的探讨液晶更广泛的应用提供了有益的参考.

## 1 理论分析

本文利用偏光干涉理论<sup>[3,5,7]</sup>,对液晶的磁控双折射效应进行了研究. 通常情况下向列相液晶的光轴与分子轴一致,当在液晶上加纵向磁场时,液晶中分子发生重排,导致光轴转动,将厚度为  $d$  的液晶盒放在起偏器和检偏器之间(如图 1),其中  $P_1, P_2$  分别为起偏器和检偏器,其光轴相互正交,LC 为液晶盒,在不加磁场时其光轴与  $P_1, P_2$  的光轴成 45°.

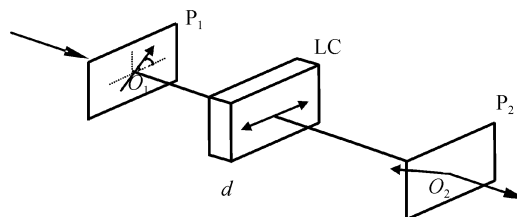


图 1 偏光干涉法测量液晶双折射率

Fig. 1 The testing of birefringence of liquid crystal by polar light interference method

令波长为  $\lambda$  的光线垂直于液晶盒表面入射,寻常光和非常光的相位差为

$$\delta = 2\pi d \Delta n / \lambda \quad (1)$$

因此,双折射率为

$$\Delta n = \delta \lambda / 2\pi d \quad (2)$$

当起偏器与检偏器的透光方向相互垂直和平行时,透过光强分别为<sup>[3,5]</sup>

$$I_{\perp} = \frac{1}{4} I_0 \sin^2 2\phi \{ \exp(-\alpha_o d) + \exp(-\alpha_e d) - 2 \exp[-(\alpha_o + \alpha_e)d/2] \cos \delta \}$$

$$I_{\parallel} = I_0 \{ \{ \exp(-\alpha_o d) + \exp(-\alpha_e d) - 2 \exp[-(\alpha_o + \alpha_e)d/2] \} \cos^4 \phi + 2 \exp[-(\alpha_o + \alpha_e)d/2] - 2 \exp(-\alpha_e d) \cos^2 \phi + \exp(-\alpha_e d) - \exp[-(\alpha_o + \alpha_e)d/2] \sin^2 2\phi \sin^2(\delta/2) \}$$

式中  $I_0$  是入射光的光强,  $\phi$  是起偏器与液晶光轴的夹角,一般取  $\phi = 45^\circ$ ,  $\alpha_o$  和  $\alpha_e$  代表 o 光和 e 光的吸收系数. 当  $(\alpha_e - \alpha_o)d/2 \ll 1$  时,即寻常光和非寻常光的吸收系数的差别可忽略时,则

$$I_{\perp} = I_0 \exp(-\alpha_o d) \sin^2(\delta/2) \quad (3)$$

$$I_{\parallel} = I_0 \exp(-\alpha_o d) \cos^2(\delta/2) \quad (4)$$

为了提高测量准确度,克服因光源起伏等多种原因给光强测量带来的误差,采用比对的方式,令

\* 国家自然科学基金(60278001)和高等学校博士学科点专项科研基金(20020056001)资助

Tel: 022-27407676 Email: rgj1@eyou.com

收稿日期: 2005-08-25

$I_{\perp} = I_{\perp} / I_0, I_{\parallel} = I_{\parallel} / I_0$ ,即用透射比表示

$$I_{\perp} = \exp(-\alpha_o d) \sin^2(\delta/2) \tag{5}$$

$$I_{\parallel} = \exp(-\alpha_e d) \cos^2(\delta/2) \tag{6}$$

由式(5)和(6)得

$$|\delta| = N\pi + 2\arctan \sqrt{\frac{I_{\perp}}{I_{\parallel}}} \quad (N=0, 2, 4, \dots) \tag{7}$$

$$|\delta| = (N+1)\pi - 2\arctan \sqrt{\frac{I_{\perp}}{I_{\parallel}}} \tag{8}$$

(N=1, 3, 5...)

通过实验数据可以确定式中的  $N, I_{\perp}$  和  $I_{\parallel}$  的值,由式(7)、(8)得到延迟量  $\delta$ ,再利用式(2)得出液晶的双折射率  $\Delta n$ . 从而得到在温度、入射光波长一定时,液晶的双折射率  $\Delta n$  随磁场的变化关系,同时也可得到在施加磁场、入射波长一定时液晶的磁控双折射率  $\Delta n$  与温度的变化关系.

### 2 实验装置

整个实验装置如图 2,主要由 5 部分组成:1)光源部分:激光器,光阑,格兰·泰勒棱镜. 2)外部可调谐磁场发生设备:JG-3 型激光电磁铁;WWL-3 型直流恒压稳压电源;磁强计. 3)待测液晶样品. 4)旋光测量部分:格兰·汤普逊棱镜;测角仪. 5)信号探测器部分:AV23117 型光功率传感器;AV2494 型光功率计.

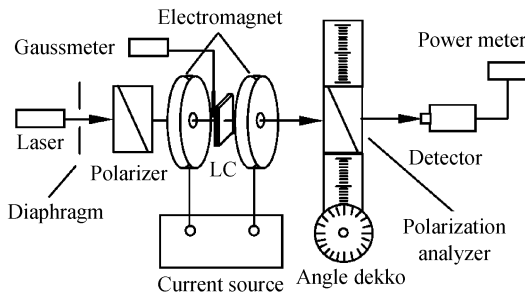


图 2 液晶磁控偏振特性测试系统光路及装置  
Fig. 2 The device and beam path of experiment

所用仪器:光源采用 1530 nm 红外激光器;起偏器使用格兰·泰勒棱镜,使入射光变为沿某一方偏振的线偏振光;JG-3 型电磁铁(吉林大学,2002 年产)是在恒定磁场下作激光实验专用设备,它与 WWL-3 型直流恒压稳压电源配合使用,可连续调节磁场强度的大小,能够提供连续变化的静磁场;测角仪(内置检偏器使用格兰·汤普逊棱镜),通过测量偏振面的旋转角度,间接测量液晶分子轴的偏转;光电探测器用以记录透射光的强度.

### 3 结果分析与讨论

实验所用的液晶材料为 BL-009 ( $\Delta n = 0.283, \Delta \epsilon = 12.8, d = 11 \mu\text{m}$ )型向列相液晶,在室温  $20^\circ\text{C}$  下

用 JG-3 型连续可调磁场仪对液晶盒施加垂直于其表面的磁场,用 CT5A 型特斯拉计准确读出磁场强度数值,仔细调整光路,使液晶盒光轴方向与起偏镜和检偏镜偏振方向成  $45^\circ$ ,分别测出起偏镜和检偏镜偏振方向平行和垂直时的透射光强度. 同时测出了 E70 型向列相液晶的双折射率与磁场的变化关系,得出了与 BL-009 型向列相液晶相似的变化规律.

#### 3.1 液晶透射光强度与磁场的关系

液晶透射光强度随磁场变化的关系曲线如图 3. 通过分析得出磁场从 0-2000mT 所测得的  $I_{\perp}$  和  $I_{\parallel}$  两条透射比曲线有三次相交,其交点分别在 500, 820 和 1250mT 处. 如果将三个点连起来,近似一条与横坐标相平行的直线,从两条曲线相对连线的对称性,明显看出强度  $I_{\perp}$  和  $I_{\parallel}$  的互补性,即对一束入射的线偏振光进入液晶如同进入单轴双折射晶体,将按光轴方向被分解为 o、e 两个相互垂直振动的线偏振光. 如果不考虑吸收等因素  $I_0 = I_{\perp}(\theta) + I_{\parallel}(\theta)$ . 图 3 中两条曲线较好的互补性,说明在推导式(3)、(4)时假设吸收系数  $\alpha_o$  和  $\alpha_e$  差别可忽略的结论是正确的.

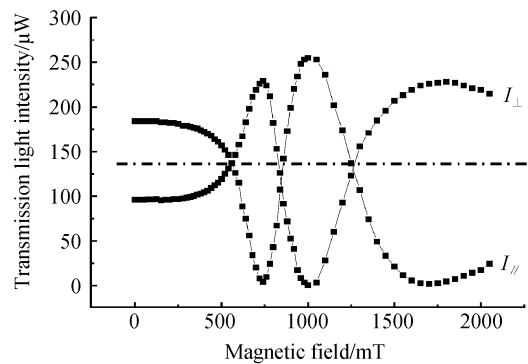


图 3 透射光强度与磁场的关系曲线  
Fig. 3 The relation between transmission and magnetic field

随着所加磁场的变化,液晶双折射率在不断的改变,从而引起寻常光和非常光对应的光程差不断变化,表示为

$$\delta' = \Delta n(H) d (2\pi/\lambda) \tag{9}$$

式中双折射率  $\Delta n(H)$  是磁场强度的函数,它在磁场的作用下将连续变化,由图 3 曲线也可看出  $\Delta n(H)$  随磁场的变化规律.

1) 由于取线偏振光与液晶光轴呈  $45^\circ$ ,所以干涉结果测得光强应是在 0 和极大之间变化. 图中看出  $I_{\perp}$  (或  $I_{\parallel}$ ) 的极小值都出现在“0”附近,说明分析的正确性.

2) 随磁场的连续变化,液晶双折射率在连续变化,从而使寻常光和非常光的光程差连续变化,干涉结果使输出光强也随磁场的增加在极大和极小间类似正弦式振荡.

3)在磁场较弱时(小于500 mT)光强变化不大,这时输出光基本上由液晶的本征双折射率 $\Delta n$ 决定,也说明这时的磁场强度还不足以克服液晶分子之间的作用,当磁场连续增加,其作用超出了液晶分子之间的作用力,从而改变了分子的趋向,因而引起了液晶双折射率的急剧变化.从500 mT到1250 mT,引起 $\Delta n(H)$ 的变化恰好使光程差变化了一个 $\lambda$ .这一区间对不同液晶而言,是一个液晶分子活跃区,在外磁场的作用下,分子间很容易改变其列阵形式.磁场再增加,磁场强度大于1250 mT,液晶分子反向力的作用难以抵抗外磁场的作用,使液晶分子轴向逐渐趋于外磁场方向,即 $\Delta n(H)$ 随磁场的变化也缓慢下来,测量的输出光强也逐渐平稳.

### 3.2 液晶的双折射率与磁场的关系

作出液晶的双折射率随磁场变化的曲线如图4,其中实线为实验结果,虚线是对实验结果的拟合,拟合模型为 $y = y^0 + Ae^{-(x/t)}$ ,分析图线可得:1)液晶BL-009的阈值磁场约为500mT,在500mT以前液晶的双折射率变化较小;2)在500-1200mT之间,液晶双折射率下降较快,且随磁场连续变化;3)当磁场大于1200mT时,液晶的双折射率逐渐趋于平坦, $\Delta n \rightarrow 0$ ,这是液晶分子的力矩与外加磁场产生的力矩达到平衡的结果,此时液晶指向矢和外磁场同向.

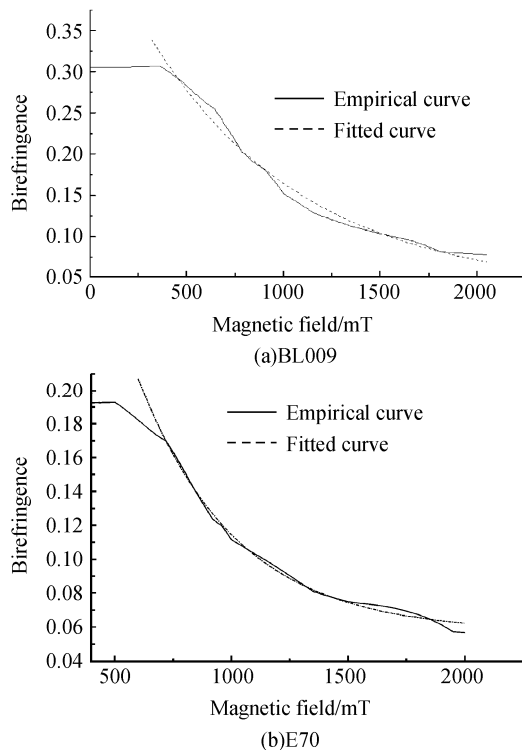


图4 液晶双折射率与磁场的关系曲线

Fig. 4 The relation between birefringence and magnetic field

测得 $\Delta n(H)$ 的变化规律又完全与图3的测量结果一致,磁场在0~500mT之间,由于 $\Delta n(H)$ 变化缓慢,引起光程差变化不大,干涉结果输出光强变

化也不大.但磁场在500~1250mT之间, $\Delta n(H)$ 的变化加剧,且是单调连续变化,所以引起的光程差也单调连续变化,此间由 $\Delta n(H)$ 引起光程差的变化恰为 $\lambda$ ,干涉结果使输出光强整变化了一个周期(图3),这一结果也正是输出光强按类似正弦规律变化的原因.磁场再加大, $\Delta n(H)$ 变化减缓并趋于定值,引起的光程差也变化不大,从而使输出光强趋向平稳.

4)磁场大于阈值磁场(500 mT),实验曲线和拟合曲线符合较好,拟合常量为: $y_0 = 3.425 \times 10^{-2}$ ,  $A = 4.555 \times 10^{-1}$ ,  $t = 7.989 \times 10^2$ .

所以能用式 $\Delta n = 3.425 \times 10^{-2} + 4.555 \times 10^{-1} \cdot e^{-(H/7.989 \times 10^2)}$ 来描述液晶的双折射率随磁场的变化规律.

## 4 结论

通过对磁场作用下液晶透射比的测试,研究了磁场作用下液晶的双折射效应,得出了液晶磁控双折射率的变化规律.并利用数学函数对实验图线进行了拟合,当磁场强度大于液晶的阈值磁场时,拟合函数能很好的描述液晶磁控双折射率的变化规律.所发现的液晶的磁控双折射效应及其变化规律,对液晶的更广泛应用提供了新的科学依据.

### 参考文献

- [1] XIE Yu-zhang. Liquid crystals physics[M]. Beijing: Science Press, 1988. 472-475.  
谢毓章. 液晶物理学[M]. 北京: 科学出版社, 1988. 472-475.
- [2] HUANG Xi-min, HUANG Hui-guang. Liquid crystals parts of an apparatus handbook[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 1991. 50-53.  
黄锡珉, 黄辉光, 译. 液晶器件手册[M]. 北京: 航空工业出版社, 1991. 50~53.
- [3] WANG Ning, LI Guo-hua, YUN Mao-jin. Voltage-dependent birefringence measurements of liquid crystals [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2002, **29**(12): 1064-1066.  
王宁, 李国华, 云茂金. 液晶电控双折射特性的研究[J]. 中国激光, 2002, **29**(12): 1064-1066.
- [4] WANG Wei, LI Guo-hua, XUE Dong. A study of voltage-dependent electric-control birefringence of liquid crystal [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(7): 970-972.  
王伟, 李国华, 薛冬. 液晶电控双折射率与电压关系的研究[J]. 光学学报, 2004, **24**(7): 970-972.
- [5] WU S T, EFRON U, HESS L D. Birefringence measurements of liquid crystal [J]. *Appl Opt*, 1984, **23**(21): 3911-3915.
- [6] REN Guang-jun, LI Guo-hua. Jones matrix of liquid crystal with magnetic field [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2003, **18**(5): 357-361.  
任广军, 李国华. 液晶磁控效应的 Jones 矩阵研究[J]. 液晶与显示, 2003, **18**(5): 357-361.
- [7] SOREFF R A, RAFUSE M J. Electrically controlled birefringence of

- thin nematic films[J]. *J Appl Phys*, 1972, **43**(5):2029-2036.
- [8] REN Guang-jun, LI Guo-hua, PENG Han-dong. Further research on electro-optical characteristics of liquid crystals [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2004, **19**(4):270-273.  
任广军,李国华,彭捍东. 液晶双折射效应的再研究[J]. 液晶与显示, 2004, **19**(4):270-273.
- [9] LIU Yong-jun, HU Li-fa, CAO Zhao-liang, et al. The investigation of controllable phase liquid crystal spatial light modulator[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(12):1799-1802.  
刘永军,胡立发,曹召良,等. 位相可控液晶空间光调制器的研究[J]. 光子学报, 2005, **34**(12):1799-1802.
- [10] SHEN Su, HE Sai-ling. Analysis of liquid crystal tunable feby-perot etalon filters[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(5):713-717.  
申溯,何赛灵. 液晶法布里-波罗滤波器可调谐特性分析[J]. 光子学报, 2005, **34**(5):713-717.
- [11] DING Hai-bing, PANG Wen-ning, LIU Yi-bao, et al. Photon polarization modulation with liquid crystal variable retarder [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **35**(9):1397-1399.  
丁海兵,庞文宁,刘义保,等. 液晶相位可调延迟器对光偏振态的调制[J]. 光子学报, 2006, **35**(9):1397-1399.
- [12] WANG Qiong-hua, CHENG Jian-bo. An achromatic twisted nematic liquid crystal polarization switch with a compensated film[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(3):357-360.  
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.

## A Study of Magnetism Controlled Polarization of Liquid Crystal

REN Guang-jun<sup>1,3</sup>, YAO Jian-quan<sup>1,3</sup>, LI Guo-hua<sup>2</sup>, WANG Peng<sup>1,3</sup>

(1 Institute of Laser and Optoelectronics, College of Precision Instrument and Optoelectronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072)

(2 Laser Research Institute Qufu Normal University, Shandong Qufu 273165)

(3 Key Laboratory of Optoelectronic Information Science and Technology, Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072)

Received date: 2005-08-25

**Abstract** The polarized light interference method is employed to measure the birefringence of liquid crystal. The transmission of nematic liquid crystal magnetism-dependent are tested by using JG-3 type continuous tunable magnetism device in room temperature 20°C. When the angle among liquid crystal cell optical axis and polarizer and polarization analyzer is 45°, the transmission light intensity is respectively tested under parallel and uprightness of polarizer and polarization analyzer. The method of mathematic function fitting is employed to obtain the rule of liquid crystal birefringence magnetism-dependent, the theory very agree with practice. After analyzing the experimental result, Magnetism Controlled birefringence of liquid crystal is obtained. The obtained result is useful for the design and manufacturing, application of liquid crystal device.

**Key words** Liquid crystal; Magnetism controlled; Birefringence; Polarization



**REN Guang-jun** was born in 1963, in Shandong province, China. He received the M. S. degree in optics in 2004. Since then he has been working for the Ph. D. degree in Institute of Laser and Optoelectronics in Tianjin University. His research fields include solid state laser, fiber laser, nonlinear transformation of frequency and laser polarization light technology. He has been an associate professor since 2001.