

液晶磁致旋光的研究*

任广军^{1)†} 姚建铨^{1)‡} 王 鹏^{1)‡} 张 强^{1)‡} 张会云^{1)‡} 张玉萍^{1)‡}

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) 天津大学光电信息科学技术教育部重点实验室, 天津 300072)

(2006 年 5 月 19 日收到, 2006 年 7 月 5 日收到修改稿)

利用矩阵方法分析了液晶的旋光效应, 导出了液晶旋光的矩阵表示. 利用 JG-3 型连续可调谐磁场仪搭建实验装置, 红外 1350 nm 激光器做光源, 测量了偏振光通过磁场作用下 BL-009 型向列相液晶的旋光角, 详细分析了磁场对液晶旋光性能的影响. 通过实验测试, 对液晶的阈值磁场强度进行了讨论, 同时对实验结果进行了理论上的分析, 得出了液晶旋光角随磁场与液晶盒表面夹角而变化的结论, 验证了液晶分子轴的旋转方向与磁场的方向无关, 这为更好的研究液晶的特性以及液晶器件的设计具有重要的参考价值.

关键词: 液晶, 矩阵, 磁致旋光

PACC: 6130G, 4225J

1. 引 言

液晶是介于完全规则的晶体和各向同性的液体之间中间态的一种物质, 分向列型液晶、近晶型液晶和胆甾型液晶三类, 光学上类似单轴晶体, 一般的情况下光轴与分子的长轴方向一致. 构成液晶物质的分子, 大体上呈细长棒状或扁平状, 其分子排列大部分具有固定的电偶极矩. 并且在三类液晶中各有自己特殊的排列方式, 由于液晶分子排列并不像晶体分子的排列那样牢固, 所以很容易受到电场、磁场、温度、应力以及吸附杂质等的外部刺激的影响, 从而使其光学性质发生变化. 液晶最突出的特性之一就是可以通过外加电场或磁场来控制指向矢的方向, 也就是说可以通过外加电场或磁场来控制液晶层内光轴的分布, 从而控制穿过液晶层的偏振光的状态. 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. 目前, 人们在液晶应用上特别是在显示技术方面的研究越来越成熟. 然而, 由于液晶的阈值磁场较大, 通过实验研究液晶的磁控效应比较困难, 对外加磁场作用下液晶旋光效应的研究很少报道. 因此很有必要进行这方面的研究工作. 本文成功设计测试装置, 测量了偏振光通过磁场作用下向列型液晶

的旋光角大小, 研究了液晶的磁致旋光效应, 并对液晶的阈值磁场进行了测试与讨论, 验证了液晶的旋光方向与磁场方向无关的结论^[1-5].

2. 液晶旋光效应的理论分析

液晶分子均匀排列的向列相液晶具有单轴晶体性质, 并且在外磁场作用下, 液晶分子的排列会发生变化, 即光轴发生旋转. 假定液晶盒两片基片之间的距离为 d , 对基片的表面处理是使液晶指向矢将沿玻璃平行排列, 并且在两片基片上指向矢的排列取向互相平行, 称为沿面校列液晶盒, 如图 1, 液晶盒的 Jones 矩阵为^[2,6]

$$J = R(-\psi_d) \begin{pmatrix} \cos X - \frac{i\Gamma \sin X}{2X} & \frac{\psi_d \sin X}{X} \\ -\frac{\psi_d \sin X}{X} & \cos X + \frac{i\Gamma \sin X}{2X} \end{pmatrix}, \quad (1)$$

其中 $R(-\psi_d) = \begin{pmatrix} \cos \psi_d & -\sin \psi_d \\ \sin \psi_d & \cos \psi_d \end{pmatrix}$, $R(-\psi_d)$ 表示一个旋转 $-\psi_d$ 角的变换矩阵.

$$\Gamma = 2\pi(n_e - n_o)d/\lambda, \quad X = \sqrt{\psi_d^2 + (\Gamma/2)^2}, \quad (2)$$

* 国家自然科学基金(批准号: 60278001)和高等学校博士学科点专项科研基金(批准号: 20020056001)资助的课题.

† E-mail: rgj1@eyou.com

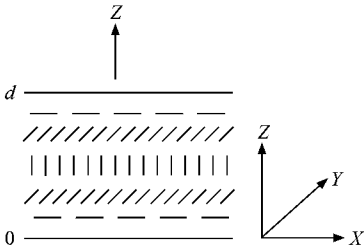


图 1 液晶盒

假设一偏振态为 $E_1 = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$ 的线偏振光垂直入射进入液晶盒, 则出射光的偏振态为

$$E_2 = JE_1 = \begin{pmatrix} \cos\psi_d & -\sin\psi_d \\ \sin\psi_d & \cos\psi_d \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \cos X - \frac{i\Gamma \sin X}{2X} & \frac{\psi_d \sin X}{X} \\ -\frac{\psi_d \sin X}{X} & \cos X + \frac{i\Gamma \sin X}{2X} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\psi_d & -\sin\psi_d \\ \sin\psi_d & \cos\psi_d \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos X - \frac{i\Gamma \sin X}{2X} \\ -\frac{\psi_d \sin X}{X} \end{pmatrix} = \frac{1}{2X} \begin{pmatrix} 2X \cos X \cos \psi_d - i\Gamma \sin X \cos \psi_d + 2\psi_d \sin X \sin \psi_d \\ 2X \cos X \sin \psi_d - i\Gamma \sin X \sin \psi_d - 2\psi_d \sin X \cos \psi_d \end{pmatrix} \quad (3)$$

由(2)式可知, X 与 ψ_d 有关, 且 ψ_d 与出射偏振光的旋光角相等, 所以出射光的偏振态随液晶分子轴的旋转而变化。

讨论如下:

1) 当 $\psi_d = 0$ 时, $\Gamma = 2\pi(n_e - n_o) \frac{d}{\lambda}$, $X = \frac{\Gamma}{2} = \pi(n_e - n_o) \frac{d}{\lambda}$, 这时出射光的偏振态为

$$E_2 = \left[\cos\pi(n_e - n_o) \frac{d}{\lambda} - i\sin\pi(n_e - n_o) \frac{d}{\lambda} \right] \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (4)$$

与入射光的偏振态一致, 即偏振态不发生变化. 这时的液晶盒相当于一个相位延迟片.

2) 当 $\psi_d = \pi/4$ 时, $\Gamma = 2\pi(n_e - n_o) \frac{d}{\lambda}$, $X = \frac{\pi}{4} \sqrt{\lambda^2 + 64(n_e - n_o)^2 d^2}$, 这时出射光的偏振态为

$$E_2 = \frac{\sqrt{2}}{4X} \begin{pmatrix} 2X \cos X - i\Gamma \sin X + \sqrt{2} \sin X \\ X \cos X - i\Gamma \sin X - \sqrt{2} \sin X \end{pmatrix}, \quad (5)$$

出射光的偏振态发生了变化, 此为一椭圆偏振光.

3) $\psi_d = \pi/2$ 时, 这时由于液晶分子轴与 z 轴方向一致, 相当于入射光沿光轴方向传播, 没有双折射现象^[7,8] $\Delta n = n_e - n_o = 0$, 即 $\Gamma = 0$, $X = \frac{\pi}{2}$, 这时出射光的偏振态为

$$E_2 = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (6)$$

出射光偏振态与入射光偏振态完全一样.

以上利用矩阵理论分析的结果与参考文献^[7]中利用其他方法得出的结果完全一致.

3. 液晶磁致旋光的实验装置

实验装置如图 2 所示^[1]. 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向偏振的线偏振光; JG-3 型电磁铁(吉林大学, 2002 年产)是在恒定磁场下做激光实验专用设备, 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·汤姆逊棱镜), 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.

实验所用的液晶盒为 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°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

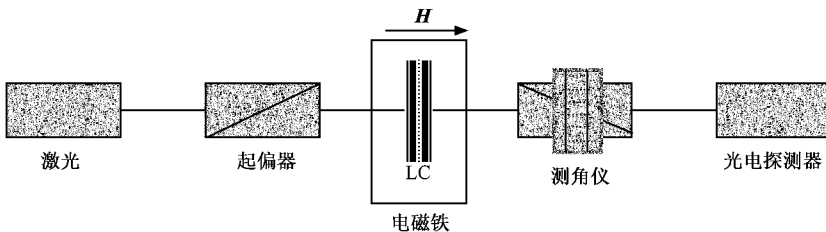


图 2 液晶磁场旋光的实验测试

值. 实验时,使液晶盒光轴方向与起偏镜和检偏镜偏振方向成 45° 角,仔细调整光路,使入射光经过整个光路后能到达探测器,改变磁场大小,分别记下不同磁场下对应的透射光强度和偏振面的旋转角.

4. 实验结果分析与讨论

4.1. 磁场对液晶旋光性能的影响

图 3 是对 BL-009 型向列相液晶的测试结果,液晶盒表面与磁场方向垂直. 从图 3 可知,磁场强度较小时,液晶分子轴没有变化,只是当磁场强度达到一定值(阈值磁场)后液晶的分子轴才开始旋转,这时磁场强度已大约为 500 mT ,液晶分子轴逐渐旋转,但当磁场强度达到约 750 mT 时,分子轴的旋转转向,并且随着磁场强度的增强,液晶分子轴的旋转角亦逐渐增大,直至与磁场方向一致. 开始分子轴的回转,估计是由于还没有达到液晶的阈值磁场,但已经使得液晶分子比较活跃,在平衡位置周围振动,

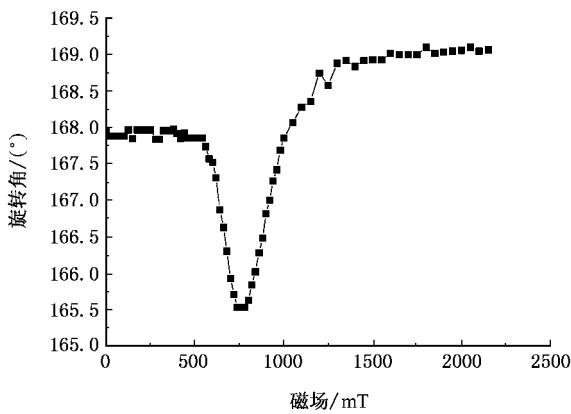


图 3 液晶分子轴旋转角与磁场强度的关系

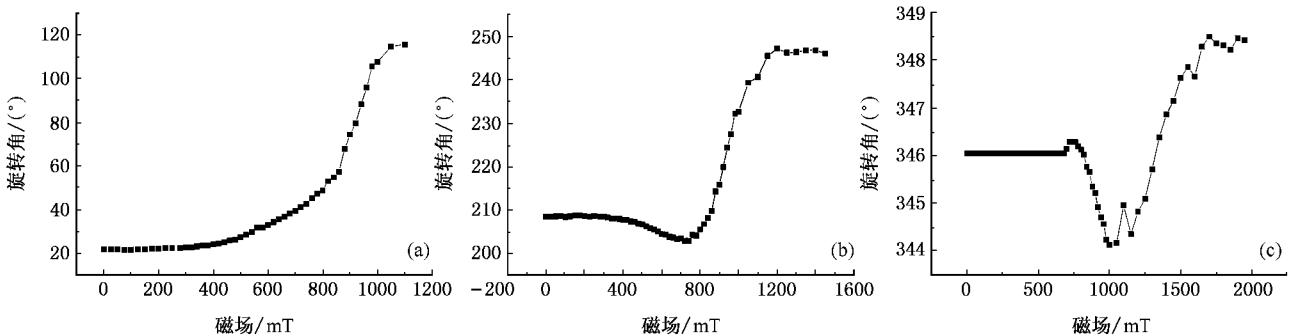


图 4 偏振面旋转角与磁场的关系

产生不稳定性,当磁场强度超过阈值磁场时,液晶分子轴在磁场的作用下向磁场方向转动. 这正说明了液晶分子之间,在常态下保持着一种分子之间的平衡力,这种力使液晶在一定条件下保持着相对稳定的物理特性,当外加磁场的作用超过分子之间的平衡力时,分子将在外磁场的作用下发生轴向转动,外加磁场越强这种转动越厉害. 当磁场强度达到近 1500 mT 时,再增加磁场强度,分子轴旋转不明显,这是由于液晶分子轴方向已与磁场方向一致的缘故,此时液晶分子排列与磁场方向平行^[9,10].

4.2. 液晶磁致旋光的阈值特性

液晶分子轴与起偏镜的偏振方向平行时,通过旋转检偏镜来测量透射光偏振面旋转角与所加液晶盒上磁场的关系,测试结果如图 4 所示.

从图 4 可知,当液晶分子轴与起偏镜的透偏方向平行时,入射偏振光通过液晶盒后,其透射光偏振面旋转随着加在液晶盒上的磁场而发生变化,正是由于随着所加磁场的增强,液晶分子轴发生偏转,从而使液晶的光轴发生转动. 图 4(a)是磁场与液晶盒平行时亦即磁场方向与液晶盒表面平行(夹角为 0°)的曲线. 从图 4(a)看出,磁场较小时,液晶分子旋转没有变化,磁场强度达到 400 mT 时,液晶分子轴有所旋转,当磁场强度接近 600 mT 时分子轴地旋转比较明显,并且这时磁场对液晶分子轴旋转的影响较大. 图 4(b)是磁场与液晶盒表面成 45° 角旋转角随磁场强度的变化关系,从图 4(b)可看出,磁场强度大约 760 mT 时分子轴开始有明显的旋转,此后随磁场强度的增强,液晶分子轴的旋转角逐渐增大,受磁场的影响程度介于图 4(a)和图 4(c)之间,说明磁场对液晶分子轴的影响程度也介于两者之间. 图 4(c)是磁场方向与液晶盒表面方向垂直(夹角为

90°)的曲线,磁场强度达到 750 mT 时,液晶分子轴有所变化,但在磁场强度接近 1000 mT 时分子轴才开始明显地旋转,阈值磁场较大,分子轴随磁场的变化比较缓慢^[11,12].

从图 4 中的 3 个图可知,液晶分子轴旋转的阈值磁场强度与磁场和液晶盒的相对方向有关.当磁场与液晶盒平行时,比较容易打破分子之间的平衡力,分子轴地旋转受磁场的影响较大,这时阈值磁场

较小.磁场与液晶盒垂直时,液晶分子受盒表面的束缚较大,再加上锚定能的影响,要想改变分子的平衡状态,就必须提供更高的能量,因此需要较大的磁场才能使液晶分子轴发生旋转,此时的阈值磁场较大.磁场与液晶盒成 45°角时,磁场对液晶分子轴旋转的影响介于以上两种情况之间,阈值磁场亦介于二者之间.图 5 绘出了液晶分子排列模型以及液晶盒在磁铁两极之间的实际光路图^[13].

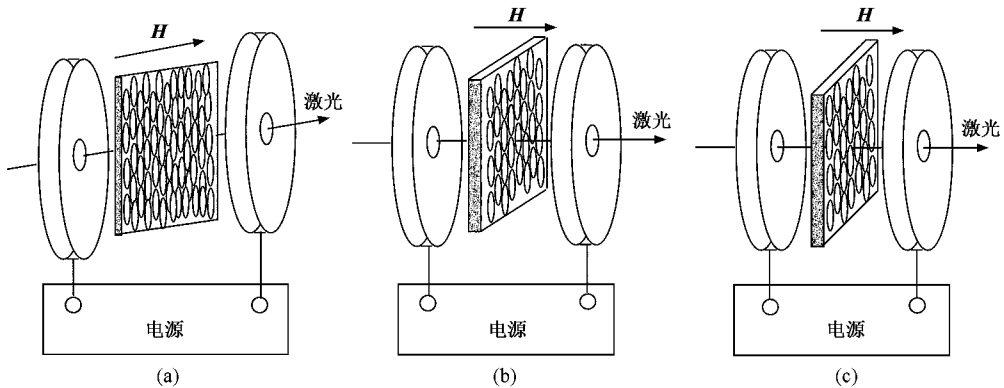


图 5 液晶分子模型及其在磁铁两极之间的光路图

5. 结 论

利用矩阵理论详细分析了液晶的旋光效应,推导了偏振光经过液晶盒后出射偏振光的矩阵表达式.通过实验测试加以比较,理论与实验相符合.实验中通过对液晶盒施加不同方向的磁场,多次测

量液晶分子轴的旋转角,发现液晶分子旋转的阈值磁场与磁场和液晶盒表面的夹角有关(图 4).同时,通过实验测试验证了液晶分子轴的旋转方向与磁场的方向无关.利用液晶的这些性质,可以制成光偏转器和光调制器等器件.同时为更好的研究液晶的特性以及为液晶器件的设计提供了有力的参考.

- [1] Ren G J, Yao J Q, Li G H, Zhao J L, Wang P 2006 *Optoelectronics. Laser* **17** 502 (in Chinese) [任广军、姚建铨、李国华、赵阶林、王 鹏 2006 光电子·激光 **17** 502]
- [2] Ren G J, Li G H 2003 *Chin. J. of Liq. Crys. and Displ.* **18** 357 (in Chinese) [任广军、李国华 2003 液晶与显示 **18** 357]
- [3] Chandrasekhar F R S 1992 *Liquid Crystals* (New York: Cambridge University Press) p1
- [4] Hu X D, Xiang Y, Lin Z Y, Li T, Zhang J L, Wei B P 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 192 (in Chinese) [胡西多、项 颖、林子扬、李涛、张介立、魏兵平 2003 物理学报 **52** 192]
- [5] Liu H, Wang H 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 1306 (in Chinese) [刘红、王 慧 2005 物理学报 **54** 1306]
- [6] Song F J 1999 *Neoteric Optical Information Disposal* (Beijing: Beijing University Press) p184 (in Chinese) [宋菲君 1999 近代光学信息处理 北京:北京大学出版社 第 184 页]

- [7] Wang D F, Sun H J 1991 *The Last Technology of Liquid Crystals—Corporality·Material·Application* (Beijing: Chemical Industry Press) p28 (in Chinese) [王殿福、孙红军 1991 液晶的最新技术——物性·材料·应用 北京:化学工业出版社 第 28 页]
- [8] Wang D C 1959 *Crystal Optics* (Beijing: Geologic Press) p123 (in Chinese) [王大纯 1959 晶体光学 北京:地质出版社 第 123 页]
- [9] Lin Z Y, Xiang Y, Zhang J L, Ma S Y, Xu Z D 1999 *Acta Phys. Sin.* **48** 1898 (in Chinese) [林子扬、项 颖、张介立、马仕永、徐则达 1999 物理学报 **48** 1898]
- [10] Liu J J, Shen M, Liu X J, Yang G C 2006 *Chin. Phys.* **15** 163
- [11] McIntyre P 1978 *J. Opt. Am.* **68** 869
- [12] Mottram N J, Hogan S J 2002 *Continuum. Mech. Thermodyn.* **14** 281
- [13] Zhang Z D, Li J, Wei H P 2005 *Chin. Phys.* **14** 393

Research of magneto-optical rotation of liquid crystal^{*}

Ren Guang-Jun^{1,2,†} Yao Jian-Quan^{1,2} Wang Peng^(1,2) Zhang Qiang^{1,2} Zhang Hui-Yun^{1,2} Zhang Yu-Ping^{1,2}

¹ *Institute of Laser and Optoelectronics, College of Precision Instrument and Opto-electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China*

² *Key Laboratory of Optoelectric Information Science and Technology, Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China*

(Received 19 May 2006 ; revised manuscript received 5 July 2006)

Abstract

The matrix method is employed to analyze the optical activity of liquid crystal, and the matrix presentation of optical rotation is given. The magneto-optical rotation angle of BL-009 nematic liquid crystal is measured using JG-3 type continuous tunable magnetism device and infrared 1350 nm laser. The effect of magnetic field on optical rotation capability of liquid crystal is analyzed in detailed. The threshold of liquid crystal is discussed through experimental testing, and we reached at the conclusion that the rotation direction in liquid crystal is independent of the direction of magnetic field. The obtained result is useful for the design and manufacturing of liquid crystal device.

Keywords : liquid crystal, matrix, magneto-optical rotation

PACC : 6130G, 4225J

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60278001) and the Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education of China (Grant No. 20020056001).

[†] E-mail : rgjl@eyou.com