

平行排列丝状液晶在超短脉冲激光激励下 发生瞬态扭曲形变的最佳偏振角*

胡西多¹⁾ 项颖²⁾ 林子扬²⁾ 李涛³⁾ 张介立²⁾ 魏兵平⁴⁾

¹⁾ 东莞理工学院, 东莞 523000)

²⁾ 中山大学物理系, 广州 510275)

³⁾ 中山大学化学系, 广州 510275)

⁴⁾ 刚达电子厂, 深圳 519000)

(2002 年 3 月 18 日收到, 2002 年 4 月 23 日收到修改稿)

利用光学相位延迟法, 观察到平行排列丝状液晶在超短脉冲激光(10ns)激励下的瞬态扭曲形变. 实验结果表明, 虽然脉冲激光的电场强度远远大于液晶发生扭曲形变的阈值, 但并不能保证液晶会发生瞬态扭曲形变. 这主要是因为脉冲激光的激励时间非常短, 而液晶分子发生扭曲形变的响应时间相对较长, 从而使其来不及形变. 分析发现, 激励激光的偏振方向与平行排列丝状液晶分子的最佳夹角是 45° . 利用此条件, 观察到掺微量 D 型苏氨酸吡啶的平行排列丝状液晶在超短脉冲激光激励后具有记忆效应, 这在光存储和记忆显示方面有很大的实用价值.

关键词: 液晶显示, 光控排列

PACC: 6470M, 1240E

1. 引 言

液晶分子具有较大的光学各向异性($\Delta n = 0.1-0.2$), 因而有较强的光学非线性效应. 其光学非线性效应的主要贡献来自于液晶分子在外场中的转动. 目前国外有大量的文献报道丝状液晶在强激光激励下的光学非线性效应^[1-4]. 在激励激光是连续的情况下, 只需激光的光场强度超过液晶分子发生转动形变的阈值, 即可发生转动形变(freedericksz transition), 传统的作法是使激励激光的偏振方向与液晶分子的排列取向垂直. 在激励激光是超短脉冲的情况下, 尽管激励激光的光场强度远远超过液晶分子发生转动形变的阈值, 却并不能保证液晶分子会发生瞬态转动形变. 有关文献对此并没有作出详细的分析.

我们利用光学相位延迟法, 详细观察和分析了平行排列(planar)丝状液晶在超短脉冲激光激励下的瞬态扭曲形变. 本文使用平行排列丝状液晶, 在激励激光作用下只有纯粹的扭曲形变, 而没有反流

(backflow)^[5], 这样可以简化实验分析. 理论估算和实验结果都表明, 必须使脉冲激光的偏振方向与平行排列丝状液晶分子的取向之间有一个合适的夹角, 才能保证液晶分子发生瞬态扭曲形变. 作为一个应用, 我们观察到掺微量 D 型苏氨酸吡啶的平行排列丝状液晶在超短脉冲激光激励后具有记忆效应, 这在光存储和记忆显示方面有很大的实用价值.

2. 实验布置和结果

实验使用石家庄清华液晶厂提供的 5CB 液晶, 丝状相的温度范围 $22.5^\circ\text{C}-35.2^\circ\text{C}$. 样品盒由刚达电子厂提供, 盒厚 d 为 $20.0\mu\text{m}$. 预倾角约为 1° , 前后两面打磨方向相同, 平行排列取向. 实验室温度 26°C .

我们使用光学相位延迟法来检测液晶分子在超短脉冲激光激励下的瞬态扭曲形变. 光路如图 1 所示. 未加光场时, 平行排列液晶的指向矢 n 在 $X-Y$ 平面内且与 X 轴平行(忽略预倾角). 激励光使用调 Q 的 YAG $1.06\mu\text{m}$ 的光, 由透镜聚焦成直径 $400\mu\text{m}$ (高斯光束强度降到中心峰值的 $1/e$ 时的直径)的圆

* 国家自然科学基金(批准号: 19474073)资助的课题.

斑打在液晶盒上, 脉冲宽度为 10 ns, 强度为 100 mJ/脉冲. 激励光的入射面为 $X-Z$ 平面, 入射方向与 Z 轴夹角为 0.5° (可以近似看成垂直入射), 偏振方向 E_Y 位于 $X-Y$ 平面内且与 Y 轴成夹角 ϕ , $\psi = 90^\circ - \phi$ 为液晶分子的取向与激励激光偏振方向之间的夹角 θ 为液晶分子的瞬态扭曲形变角. 探测光为

$0.63 \mu\text{m}$ 的 He-Ne 激光. P_1 为起偏器, 起偏方向位于 $X-Y$ 平面且与 X 轴成 -45° 夹角. P_2 为检偏器, 检偏方向位于 $X-Y$ 平面与 X 轴成 45° 夹角. D 为光电探测器, 后接泰克公司 (Tektronix) 的 400 MHz 数字存储示波器, 灵敏度可达标 2 mV/div .

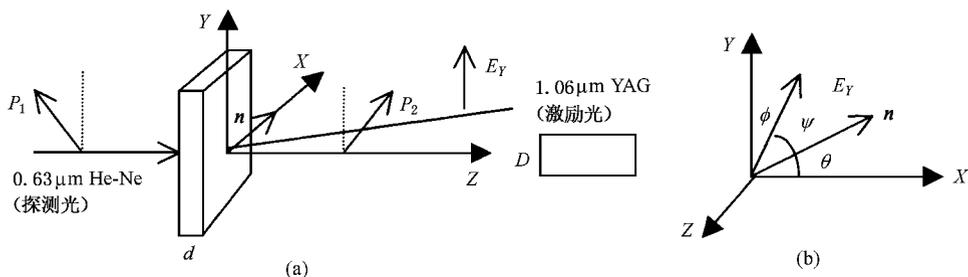


图 1 实验布置 (a) 光路图 (b) planar 液晶在激励光场作用下的扭曲形变, $\theta(z, t)$ 为扭曲形变角

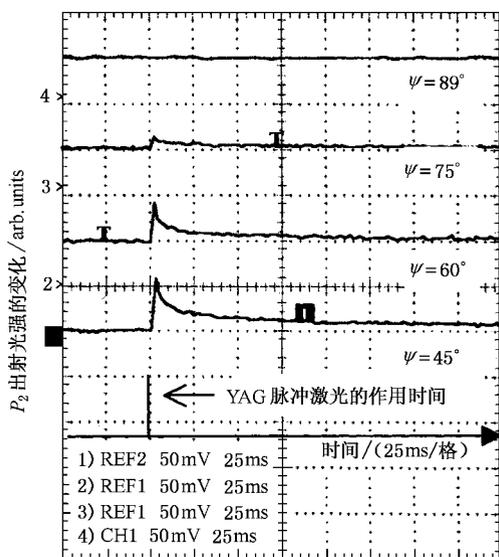


图 2 $20 \mu\text{m}$ 的 planar 液晶样品在 YAG 脉冲激光激励后的探测光强随时间变化的曲线 (相同的脉冲激光, 不同的偏振方向 ψ)

在脉冲激光 E_Y 的激励下, 液晶分子只在 $X-Y$ 平面内发生瞬态扭曲形变, 扭曲角为 $\theta(z, t)$, 使得经 P_2 出射的光强发生变化, 通过检测探测光强随时间的变化就可以得到瞬态扭曲形变的相对大小和弛豫时间. 对于扭曲形变, 通常认为无法用线偏振光来检测, 主要是因为 Manguin 限制^[6,7]. 但 Manguin 限制的前提条件是本征态入射, 即探测光的偏振方向平行或垂直于液晶分子的取向 (X 轴), 或者是较厚的样品. 本文的配置并不满足这一要求, 故仍可以采

用线偏振光来检测.

图 2 是示波器记录的 $20.0 \mu\text{m}$ 样品在 YAG 脉冲激光激励后的探测光强随时间变化的曲线 (相同的脉冲激光, 不同的偏振方向 ψ).

3. 理论估算与实验分析

当较强的超短脉冲激光作用在丝状液晶上时, 液晶分子会产生瞬态的扭曲形变, 其发生扭曲形变所需的电场阈值公式^[5]为

$$E_c = \frac{\pi}{d} \sqrt{\frac{K_2}{\epsilon_a}}, \quad (1)$$

其中 K_2 为扭曲弹性系数, ϵ_a 为光频介电各向异性常数, $E_c \approx 1.6 \times 10^5 \text{ V/m}$, 而 YAG 脉冲激光的电场强度 $E_Y \approx 2.6 \times 10^8 \text{ V/m}$, 由此可见 $E_Y \gg E_c$.

根据指向矢 n 的运动方程^[5]

$$\begin{aligned} K_2 \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} + \epsilon_a E_Y^2 \sin(\theta + \phi) \cos(\theta + \phi) \\ = \gamma \frac{\partial \theta}{\partial t}, \end{aligned} \quad (2)$$

其中 $\theta(z, t)$ 为指向矢 n 的扭曲形变角, γ 为液晶分子的黏滞系数, 在 θ 较小的情况下, 近似为 $\theta(z, t) = \theta_m(t) \sin(\pi z/d)$, $\theta_m(t)$ 为最大扭曲形变角, d 为液晶盒厚.

$$\theta_m(t) = \sqrt{\frac{A^2}{1 + (A^2/\phi^2 - 1)e^{-Bt}}}, \quad (3)$$

$$A^2 = 2(E_Y^2 - E_c^2)E_Y^2, B = 2\epsilon_a(E_Y^2 - E_c^2)\gamma.$$

施加光场后,液晶分子的响应时间

$$T_{\text{rise}} = \gamma / \epsilon_a (E_Y^2 - E_c^2) \approx 50\text{ns}.$$

相对激励激光的脉宽(10ns)而言,液晶分子的响应时间很长,因此在脉宽这段时间内,液晶分子的扭曲角 θ_m 非常小.

随着光场的撤离,液晶进入弛豫阶段,其弛豫时间^[5]

$$T_{\text{decay}} = (\gamma / K_2) (d/\pi)^2 \approx 100\text{ms}.$$

从图 2 可以看出弛豫时间与理论估算的 T_{decay} 基本一致.

根据(3)式,还可以估算出相同的激光脉冲,不同的偏振方向 ψ 所引起的液晶分子的最大扭曲形变角

$$\psi = 89^\circ, \phi = 1^\circ, \theta_m(10\text{ns}) \approx 0.3^\circ,$$

$$\psi = 75^\circ, \phi = 15^\circ, \theta_m(10\text{ns}) \approx 5.0^\circ,$$

$$\psi = 60^\circ, \phi = 30^\circ, \theta_m(10\text{ns}) \approx 8.0^\circ,$$

$$\psi = 45^\circ, \phi = 45^\circ, \theta_m(10\text{ns}) \approx 9.0^\circ.$$

估算结果与图 2 是相符的,当 $\psi = 45^\circ$ 时,激励脉冲激光所产生的瞬态扭曲形变最大,而 $\psi = 89^\circ$ (垂直)则基本没有.从液晶分子所受的电场力矩 $\Gamma = \epsilon_a E_Y^2 \sin(\theta + \phi) \cos(\theta + \phi)$ 可以看出,当 θ 很小, $\phi = 45^\circ$ ($\psi = 45^\circ$) 时液晶分子所受的电场力矩最大,响应速度最快,扭曲形变最大; $\phi = 1^\circ$ ($\psi = 89^\circ$) 时液晶分子所受的电场力矩最小,约为零,响应速度很小,几乎没有扭曲形变.

4. 应用实例:掺杂液晶的瞬态非线性光学效应

虽然丝状液晶具有很强的非线性光学效应,但需要很强的激光来激励,激励激光的功率密度高达 kW/cm^2 ,从而限制了液晶作为非线性光学器件的应用.为克服这个困难,人们通过在纯液晶中掺入微量合适的杂质来降低激励激光的强度,另外通过掺杂还可以使液晶在激励后具有记忆效应,从而实现光存储和全息术.

Janossy^[8,9]首先发现在纯液晶中掺入微量棒状的光吸收染料可以显著降低激励光的光强,1%的掺杂浓度能使激励光的强度降低两个量级. Janossy 认为其微观机理是由于染料分子在受到特定波长(位于染料分子的光吸收波长范围内)的激光激励时,部分分子会从基态激发到激发态,从而使染料分子的动量发生变化,而由纯液晶与染料分子组成的体系

其总动量是守恒的,染料分子动量的变化会导致液晶分子相反的动量变化,从而引起液晶分子的转动.从宏观来看,则可以认为光吸收染料在激光激励下会产生很大的光感生力矩,与纯液晶产生的光感生力矩方向一致,能够带动液晶分子转动.

Chen^[10,11]则观察到 $100\mu\text{m}$ 厚掺偶氮苯的平行排列丝状液晶在 514nm 的连续激光激励后,会将重新排列的状态保持下来,形成记忆效应.其中激励激光的偏振方向平行于丝状液晶的排列方向,功率密度为 $100\text{mW}/\text{cm}^2$,经过数秒的激励后,液晶分子重新排列,形成新的状态,撤去光场,新的状态可保持数千秒.即便这时先将液晶加热至各向同性态再冷却至液晶态,新的状态依然保持.产生这种现象的关键在于样品盒的内表面涂敷有合适的聚合物膜. Chen 认为其机理来源于以下两个因素:1)偶氮苯分子在激光(波长位于偶氮苯分子的光吸收范围内)激励下从基态激发到激发态,产生顺-反异构,带动液晶分子转动;2)偶氮苯分子与表面的聚合物分子有耦合作用,从而使新的状态稳定下来,记忆的时间和强度与聚合物分子有关.

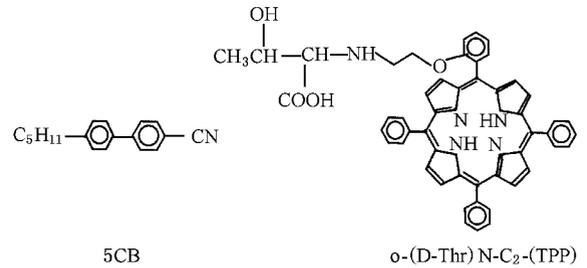


图 3 液晶与杂质的分子式

Janossy 和 Chen 均使用连续的且波长位于所掺杂质光吸收带内的激光来激励.利用本文的初始角度条件来研究掺杂液晶的瞬态非线性光学效应,实验发现掺微量 D 型苏氨酸卟啉的平行排列丝状液晶在超短脉冲激光激励后会保持新的状态,具有记忆效应. D 型苏氨酸卟啉和丝状液晶的分子式如图 3 所示.实验所用的样品为掺 1%(重量百分比) D 型苏氨酸卟啉的 5CB 液晶,样品盒为 $20\mu\text{m}$ 厚的平行排列取向.激励激光的波长为 $1.06\mu\text{m}$,强度为 $100\text{mJ}/\text{脉冲}$,脉冲宽度为 10ns ,其偏振方向与平行排列丝状液晶的取向成 45° 夹角.实验布置如前文所示. D 型苏氨酸卟啉的光吸收波长范围 400nm 到 440nm ,对 $1.06\mu\text{m}$ 的激励激光没有任何吸收,不会发生基态到激发态的跃迁.

图 4 为掺微量 D 型苏氨酸卞啉的平行排列丝状液晶在超短脉冲激光激励后的响应曲线, 可见其在激励后一直保持新的状态, 并不像纯液晶 5CB 那样弛豫回到初始状态. 记忆状态可以长久保持, 除非将掺杂液晶加热至液态(各向同性)再冷却至液晶态, 才能回到初始状态, 这与 Chen 所观察到的记忆

效应不一样. 我们认为其记忆效应可能来源于 D 型苏氨酸卞啉中连接到卞啉环上的基团, 因为它具有一定的可活动性, 在峰值功率非常强的激光激励下, 基团的方向发生改变, 从而带动液晶分子转动. 当光场撤除后, 基团并不退回初始位置, 从而使液晶保持记忆状态.

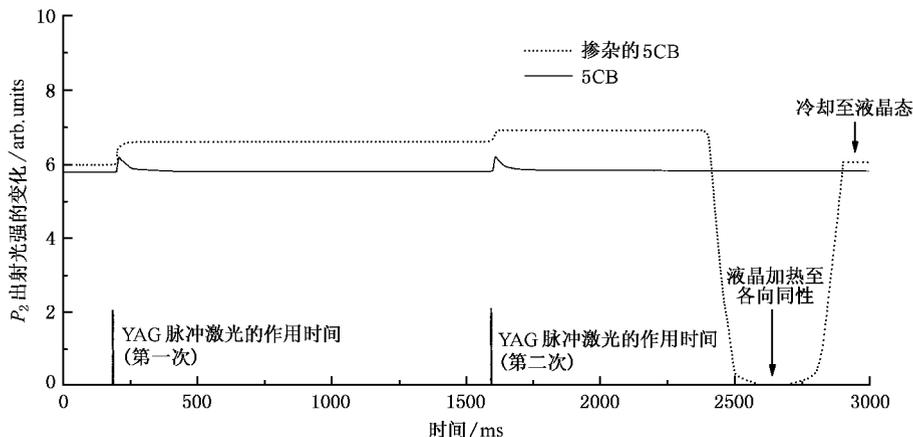


图 4 掺杂液晶在脉冲激光激励后的探测光强随时间变化的曲线

5. 结 论

利用光学相位延迟法, 观察到平行排列丝状液晶在超短脉冲激光(10ns)激励下的瞬态扭曲形变. 实验结果表明, 虽然脉冲激光的电场强度远远大于液晶发生扭曲形变的阈值, 但并不能保证液晶会发生瞬态扭曲形变. 这主要是因为脉冲激光的激励时

间非常短, 而液晶分子发生扭曲形变的响应时间相对较长, 使其来不及形变. 必须在激励激光的偏振方向与平行排列丝状液晶分子的取向之间有一个合适的夹角(45°最好), 从而加快液晶分子的响应时间. 应用此条件, 我们观察到掺微量 D 型苏氨酸卞啉的平行排列丝状液晶在超短脉冲激光激励后具有记忆效应, 这在光存储和记忆显示方面有很大的实用价值.

[1] Khoo I C 1991 *J. Appl. Phys.* **69** 3853

[2] Hsiung H, Shi L P and Shen Y R 1984 *Phys. Rev. A* **30** 1453

[3] Lin Z Y *et al* 1999 *Acta Phys. Sin.* **48** 1898 (in Chinese) [林子杨等 1999 物理学报 **48** 1898]

[4] Lin Z Y *et al* 1999 *Acta Phys. Sin.* **48** 1297 (in Chinese) [林子杨等, 1999 物理学报 **48** 1297]

[5] Xie Y Z 1988 *Liquid crystal physics* (Beijing :Science Press)p285 (in Chinese) [谢毓章 1988 液晶物理学(北京:科学出版社)第 285 页]

[6] De Gannes P G 1990 *The physics of liquid crystals* p105 (in Chinese) [液晶物理学(上海:上海翻译出版公司)第 105 页]

[7] Durbin S D, Arakelian S M and Shen Y R 1981 *Phys. Rev. Lett.* **47** 1411

[8] Janossy I 1994 *Phys. Rev. E* **49** 2957

[9] Marrucci L and Paparo D 1997 *Phys. Rev. E* **56** 1765

[10] Chen A G and Brady D J 1992 *Opt. Lett.* **17** 441

[11] Chen A G and Brady D J 1992 *Opt. Lett.* **17** 1231

The initial angle solution for the ultra-short laser pulse induced transient twist reorientation in a plane-aligned nematic liquid crystal^{*}

Hu Xi-Duo¹⁾ Xiang Ying²⁾ Lin Zi-Yang²⁾ Li Tao³⁾ Zhang Jie-Li²⁾ Wei Bing-Ping⁴⁾

¹⁾ (Department of Physics , Dongguan University of Technology , Dongguan 523000 , China)

²⁾ (Department of Physics , Zhongshan University , Guangzhou 510275 , China)

³⁾ (Department of Chemistry , Zhongshan University , Guangzhou 510275 , China)

⁴⁾ (Gangda Electronic Company , Shenzhen 519000 , China)

(Received 18 March 2002 ; revised manuscript received 23 April 2002)

Abstract

The optical phase retardation method was employed to observe the transient twist reorientation effect of a plane-aligned nematic liquid crystal induced by ultra-short laser pulses. The experimental result indicated that, although the electric field intensity of laser pulses is much higher than that needed for twist deformation, it does not ensure the twist reorientation under the laser pulse. This is because the width of laser pulse is very short and the response time for the twist reorientation is very long. To overcome this barrier an optimum angle (45°) between the polarization of the laser pulse and the director orientation in substrates is found by analysis. Using this initial angle, we observed a plane-aligned nematic liquid crystal cell doped with a few μ (D-Thr) N-C₂(TPP) to possess memory effect after the laser pulse pump, which was important in optical data storage and memory display.

Keywords : liquid crystal display , photoresponse alignment

PACC : 6470M ,1240E

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 19474073).