

激光诱导向列相液晶分子重新取向的研究^{*}

钱祥忠^{**}

(淮南工业学院数理系, 淮南, 232001)

摘要: 用液晶分子运动的动力学方程, 求出了激光诱导向列相液晶分子重新取向的取向角、折射率改变、阈值场强和上升时间的近似表达式。讨论了它们随液晶材料参数、激光强度和激光在液晶中传播方向的变化, 进行了数值计算。给出了激光能诱导向列相液晶分子重新取向的必备条件, 得到向列相液晶的各向异性是其分子重新取向的根本原因。

关键词: 向列相液晶 各向异性 激光诱导 分子重新取向 折射率改变

Study on laser induced molecular reorientation in nematic liquid crystals

Qian Xiangzhong

(Department of Mathematics and Physics, Huainan Institute of Technology, Huainan, 232001)

Abstract: The approximate formula of the laser induced molecular reorientation angle, refractive index change, thresholded field strength and rise time in nematic liquid crystal are obtained by means of the hydrodynamic equation of liquid crystal molecule motion. The dependence of the above parameters on the liquid crystal material parameters, laser intensity and its propagation inside liquid crystal is discussed and calculated. The essential condition which laser can induce molecular reorientation in nematic liquid crystal is given. The essential cause of molecular reorientation in nematic liquid crystal is anisotropy of its molecules have been obtained.

Key words: nematic liquid crystal anisotropy laser induced molecular reorientation refractive index change

* 安徽省自然科学基金资助。

** 电子科技大学光电子技术系博士研究生。

参 考 文 献

- 1 Ishimaru A. Wave Propagation and Scattering in Random Media. New York: Academic, 1978
- 2 Cheong W F, Pohl S A, Welch A J. IEEE J Q E, 1990; 26(12): 2166 ~ 2185
- 3 Kortum R R, Rava R P, Fitzmaurice M *et al.* IEEE Trans Biomedical Engng, 1989; 36: 1222 ~ 1231
- 4 林煜. 激光杂志, 1997; 18(1): 52 ~ 55
- 5 Wang L H, Jacques S L. Monte Carlo Modeling of Light Transport in Multi-layered tissues. Ph D dissertation, University of Texas M D Anderson Cancer Center, 1992
- 6 苏显渝, 李继陶编著. 信息光学. 第1版, 北京: 科学出版社, 1999
- 7 徐钟济 编著. 蒙特卡罗方法. 第1版, 上海: 上海科学技术出版社, 1985

作者简介: 李振华, 男, 1964年出生。副教授。主要研究领域为激光光电子学。

收稿日期: 2000-07-14

引 言

向列相(简记 N 相)液晶分子具有各向异性,在强激光照射下诱导的偶极矩与光场相互作用,将使分子重新取向,从而引起 N 相液晶的自相位调制、自聚焦、谐波、相位共轭和光学双稳态等非线性光学效应^[1,2]。实验研究表明^[2~4],在脉冲宽度远小于液晶分子弛豫时间、强度远大于阈值的激光作用下,向列相液晶将在脉冲宽度时间内响应,分子重新取向角和折射率改变为 $10^{-1} \sim 10^{-2}$ 量级,数值的大小还与激光在液晶中的传播方向有关。笔者讨论激光诱导 N 相液晶中的分子重新取向及其影响因素,指出这种诱导作用的条件和微观机理。

1 分子重新取向角

考虑一脉冲宽度为 τ_p 的线偏振强激光,照射到指向矢 \vec{n} 与边界垂直排列的向列相液晶薄膜上。光场在液晶中诱导偶极矩而产生力矩,使液晶分子的取向发生改变。当该诱导偶极子力矩与分子形变的弹性力矩平衡时,分子表现一个确定的重新取向角 β ,指向矢变为 \vec{n}' 。假定场强为 E_{op} 的光场在液晶中传播方向 \vec{s} 与指向矢 \vec{n} 的夹角为 θ ,如图 1 所示,液晶层厚为 d , Oz 轴沿 \vec{n} 方向。液晶分子运动满足 Ericksen-Leslie 近似方程^[5]:

$$\frac{\partial}{\partial t} = K \frac{\partial^2}{\partial z^2} + \frac{1}{8} E_{op}^2 \sin(2\theta + 2\beta) \quad (1)$$

式中, η 为液晶的粘滞系数, ϵ_a 为光学介电各向异性, K 为液晶的弹性系数,在 θ 较小 (10^{-2} 量级) 时,可认为 N 相液晶的展曲和弯曲弹性系数相等。在边界上有 $\theta(z=0) = \theta(z=d) = 0$ 。 $\theta(z, t)$ 的一级近似为一简单的正弦函数^[4]:

$$\theta(z, t) = T(t) \sin(\pi z/d) \quad (2)$$

将(2)式代入(1)式并对 z 从 $z=0$ 到 $z=d$ 积分得:

$$\theta(z, t) = \frac{A}{B} \left[\frac{1}{2} - D + D \frac{2D-1}{2D+1} e^{i\theta} \right] \left[1 + \frac{2D-1}{2D+1} e^{i\theta} \right]^{-1} \sin \frac{\pi z}{d} \quad (3)$$

$$\text{式中, } A = (4\eta)^{-1} E_{op}^2 \cos 2\theta - 2K / (\pi^2 d^2), B = 2(3\eta^2)^{-1} E_{op}^2 \sin 2\theta \quad (4)$$

$$C = (6\eta^2)^{-1} E_{op}^2 \sin 2\theta, D = (4\eta^{-1} + BC/A^2)^{1/2}, \theta = (2AD)^{-1}$$

$$\text{当 } z = d/2, t = \tau_p \text{ 时, } \theta(z, t) \text{ 达到最大值,其近似表达式为: } \theta_m(\theta) = \frac{3}{4} E_{op}^2 \tau_p \sin 2\theta \quad (5)$$

(5)式表明,激光诱导 N 相液晶分子重新取向角最大值与液晶的粘滞系数、介电各向异性、激光的脉冲宽度、场强以及激光在液晶中传播方向和指向矢夹角等有关,而与液晶的厚度和弹性系数无关。当 $\theta = 0$ 时, $\theta_m(\theta) = 0$,表明激光诱导的分子重新取向来源于向列相液晶的各向异性,当 $\theta = \pi/2$ 时, $\theta_m(\theta) = 0$,表明能诱导分子重新取向的激光在 N 相液晶中不能沿指向矢 \vec{n} 方向传播,即激光不能沿图 1 中的垂直边界面方向入射,这已被 Khoo^[4]的实验证实。

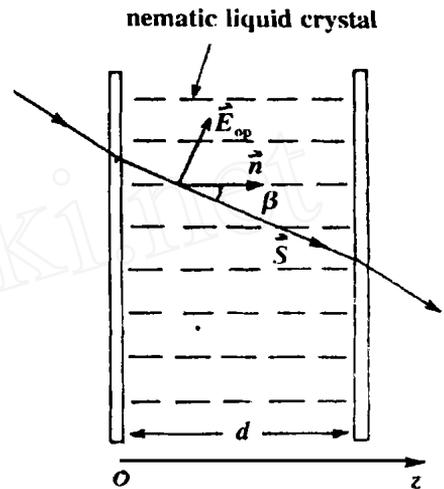


Fig. 1 Schematic diagram of laser beam propagating through a nematic liquid crystal film

2 阈值场和上升时间

由(4)式定义的 $\tau = (2AD)^{-1}$ 即为上升时间,由 A 和 D 的表达式可看出, τ 与 N 相液晶的各向异性、粘滞系数、弹性系数、液晶厚度以及激光的场强和激光在液晶中传播方向等有关。上升时间应为正值,因而 $A > 0$,从而可得到激光诱导 N 相液晶发生 Freedericks 转变的场强(即阈值场)为:

$$E_{th} = [4^{-3} K / (d^2 | \dots |)]^{1/2} \quad (6)$$

(6)式表明,阈值场取决于 N 相液晶的厚度、介电常数和弹性系数。当 $\dots = 0$ 时, E_{th} 为无限大,表明激光不能使各向同性分子诱导重新取向。由于 N 相液晶的 $\dots = 0$, E_{th} 为有限值,足够强的激光可以使 N 相液晶发生 Freedericks 转变。

3 折射率的改变

由于折射率与分子取向有关,当激光诱导 N 相液晶分子重新取向时,相应折射率也随之而发生改变。折射率改变 $n(t)$ 满足 Debye 弛豫方程^[6]:

$$\left[\frac{\partial}{\partial t} + \frac{1}{\tau} \right] n(t) = HE_{op}^2 \quad (7)$$

式中, τ 为液晶分子取向弛豫时间的一级近似,为毫秒量级, H 为耦合常数,依赖于液晶、激光及其相互作用。由(7)式可求得:

$$n(t) = HE_{op}^2 \tau (1 - e^{-t/\tau}) \quad (8)$$

对于短脉冲激光,脉冲宽度 p 为纳秒量级,则 $n \approx HE_{op}^2 p$ (9)

利用折射率与分子取向角之间的关系,可将 $n(t)$ 表示成分子重新取向角 $\theta(z, t)$ 的函数。分子取向为指向矢 \vec{n} 时对应的非常光折射率为:

$$n(\theta) = n_o [n^2 \cos^2(\theta) + n_e^2 \sin^2(\theta)]^{1/2} \quad (10)$$

而分子取向为指向矢 \vec{n} 时对应的非常光折射率为 $n(\theta)$,从而可求出折射率改变的近似表达式为:

$$\Delta n(z, t) = n(\theta) - n_o = \frac{1}{2} \frac{n_o n_e (n_e^2 - n_o^2) \sin 2\theta}{(n_o^2 \cos^2 \theta + n_e^2 \sin^2 \theta)^{3/2}} (\theta(z, t)) \quad (11)$$

n_o 和 n_e 为平行和垂直指向矢的折射率。将(11)式与(8)式比较,得到耦合系数 H 的近似表达式为:

$$H = \frac{3}{8} \frac{n_o n_e (n_e^2 - n_o^2) \sin 2\theta}{(n_o^2 \cos^2 \theta + n_e^2 \sin^2 \theta)^{3/2}} \quad (12)$$

(11)式表明,激光诱导 N 相液晶分子重新取向导致的折射率改变 Δn 近似与分子重新取向角 θ 成正比。 θ 与液晶的介电各向异性、粘滞系数、弹性系数、厚度、未受激光作用时的折射率分量、激光场强、激光在液晶中传播方向等有关。当 $n_e - n_o = 0$ 或 $\tau = 0$ 时, $\Delta n = 0$,表明折射率的改变产生于 N 相液晶的各向异性。

4 数值计算

利用(3)式和(8)式或(11)式可计算激光诱导

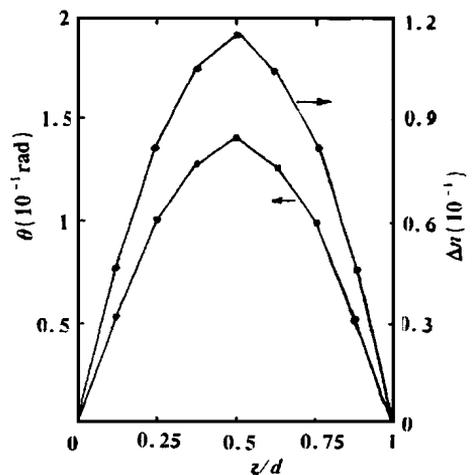


Fig. 2 Dependence of the molecular reorientation angle θ and refractive index change Δn on the distance z

N 相液晶的分子重新取向角 θ 和折射率改变 Δn 随距离液晶膜边界距离 z 和激光在液晶中传播方向与指向矢 \bar{n} 夹角 β 的变化。

图 2 为 $\beta = 20^\circ, t = t_p$ 时 θ 和 Δn 随距离 z 变化的计算曲线, 计算中各参量取值分别为: $\gamma = 4.2, \eta = 0.2 \text{ poise}, K = 1.5 \times 10^{-7} \text{ dynes}, E_{op} = 1.6 \times 10^3 \text{ V/cm}, t_p = 20 \text{ ns}, n_o = 1.60, n_e = 1.48, d = 100 \mu\text{m}$ 。

图 3 为 $z = d/2, t = t_p$ 时 θ 和 Δn 随 β 变化的计算曲线。计算中各参量取值同图 2。

从图 2 和图 3 可看出, 分子重新取向角 θ 值为 10^{-1} 量级, 折射率改变 Δn 值为 10^{-1} 量级, 与实验测量值^[4]相符。

5 结 论

在高强度短脉冲线偏振激光作用下, 向列相液晶分子取向发生变化, 导致折射率改变。笔者给出了分子重新取向角和折射率改变的近似表达式, 计算了它们随距离 z 和角度 β 的变化, 得到在典型参数值下分别为 10^{-1} 和 10^{-2} 量级, 与实验相符。液晶的各向异性、激光为强度在阈值之上、在液晶中传播方向与液晶原先指向矢不平行、短脉冲, 是激光能诱导 N 相液晶分子重新取向的必备条件。强激光作用下 N 相液晶因分子重新取向所表现的许多非线性光学性质, 都来源于 N 相液晶的各向异性。

参 考 文 献

- 1 Khoo I C, Shen Y R. Opt Engng, 1985; 24(4): 579 ~ 585
- 2 Khoo I C, Yan P Y, Liu T H *et al.* Phys Rev A, 1984; 29(25): 2756 ~ 2764
- 3 Hsiung H, Shi L P, Shen Y R. Phys Rev A, 1984; 30(3): 1453 ~ 1460
- 4 Khoo I C, Michael R R, Yan P Y. IEEE J Q E, 1987; 23(2): 267 ~ 272
- 5 de Gennes P G. The physics of liquid crystals. Oxford, England: Clarendon, 1974
- 6 Khoo I C, Hou J Y, Din G L *et al.* Phys Rev A, 1990; 42(2): 1001 ~ 1004

作者简介: 钱祥忠, 男, 1963 年 9 月出生。博士研究生, 副教授。主要从事液晶显示技术方面的研究工作。

收稿日期: 2000-09-22

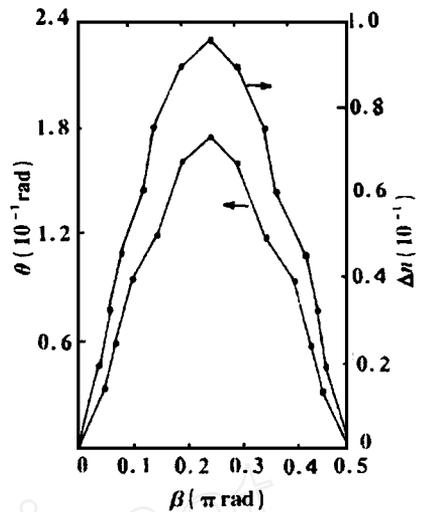


Fig. 3 Dependence of the molecular reorientation angle θ and refractive index change Δn on the angle β of laser beam propagating direction