

强激光诱导向列相液晶指向矢转动的数值研究

赵祥杰, 骆永全, 罗 飞, 张大勇

(中国工程物理研究院 流体物理研究所, 四川 绵阳 621900, E-mail: zxjdouble@163.com)

摘 要: 激光诱导液晶指向矢转动的物理过程由欧拉-拉格朗日方程描述, 激光在液晶中的传输则由麦克斯韦方程描述, 在几何光学近似条件下可以利用几何光学光线传输方程来描述。通过对这对耦合的微分方程组进行数值求解, 研究了激光诱导液晶指向矢转动的物理机制, 讨论了激光诱导液晶指向矢转动的阈值问题, 比较了不同液晶盒几何参数与不同入射激光初始偏振状态对液晶指向矢转动的影响。此外, 还研究了强激光在液晶中传输时指向矢转动对激光偏振态的影响。

关 键 词: 指向矢转动; 阈值光强; 液晶非线性; 位相延迟

中图分类号: O753⁺.2 **文献标识码:** A

Numerical Research on Laser Induced Molecular Reorientation in Liquid Crystal

ZHAO Xiang-jie, LUO Yong-quan, LUO Fei, ZHANG Da-yong

(Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics,

Mianyang 621900, China, E-mail: zxjdouble@163.com)

Abstract: The laser induced liquid crystal molecular director reorientation are described by Euler-Lagrange equation, while the electromagnetic wave propagation in liquid crystal are described by Maxwell equation. By numerically resolving these equations, the mechanism of the laser induced director reorientation was studied. The threshold issue associated with the geometric parameters of the liquid crystal cell was discussed. It was indicated that the initial polarization state of incident laser took a role in the director reorientation. Then the effect of director reorientation on the polarization state of the light were compared, which is meaningful in the comprehension of the role played by the laser induced director reorientation in liquid crystal nonlinearities.

Key words: director reorientation; threshold intensity; liquid crystal nonlinearity; phase retardation

1 引 言

基于平行排列向列相液晶材料的各种液晶光电器件目前广泛应用于强激光研究领域。由于液晶材料的非线性系数大, 可以达到 $10^{-6} \sim 10^{-7}$

(V/m)^{2[1,2]}, 强激光在这种液晶材料中传输时可能会诱导各种非线性效应, 如非线性散射与非线性双折射等, 这种非线性效应在一定程度上会影响液晶器件的光学性能, 为了明确这种非线性效应对液晶器件在强激光状态下工作的性能影响,

研究强激光作用下液晶的非线性效应非常有必要。激光诱导液晶指向矢转动是液晶非线性诸多物理机制中非常重要的一种^[3-7], 强激光作用下, 液晶指向矢的转动可以改变液晶介质的宏观电位移矢量对光强的依赖特性, 产生多种新奇的非线性效应, 因此有必要明确激光诱导液晶指向矢转动的物理机制, 本文主要通过数值模拟对此进行研究。

2 物理模型

严格描述激光与液晶的相互作用一般从体系的弗兰克自由能密度的表达出发, 通过欧拉-拉格朗日方程来获得描述激光与液晶相互作用的微分方程表达式。假设入射光为均匀分布的平面波, 只考虑一维情况, 模型如图1所示, 偏振光沿 z 轴正入射在平行排列向列相液晶盒表面入射, 液晶盒厚度为 L , Ψ_0 为光波偏振长轴与 x 轴的夹角, e_0 为入射激光的偏振椭圆率, 指向矢沿 x 轴排列, 激光诱导指向矢转动后, 指向矢与 x 轴夹角为 θ 。转动后的液晶指向矢分布又会影响激光传输的偏振状态, 是一个激光传输与激光诱导指向矢转动的耦合过程。不考虑液晶材料的黏性、惯性以及流动耦合项时, 在稳态下描述激光与液晶材料相互作用的拉格朗日方程为^[8,9]:

$$k_{22} \frac{d^2\theta}{dz^2} + \left(\frac{I}{c}\right) \frac{\lambda}{2\pi} \frac{ds_3}{dz} = 0 \quad (1)$$

其中, $\mathbf{s} = (s_1, s_2, s_3)$ 为描述光波偏振态的斯托克斯参量, I 为入射光强, λ 为波长, k_{22} 为扭曲弹性系数。式(1)左边第一项为液晶本身的弹性扭矩, 第二项为光致扭矩, 稳态时两者平衡, s_3 与光波自旋角动量成正比, 因此式(1)也表明产生光致扭矩的原因是激光自旋角动量在液晶介质中的传递。严格描述激光在液晶介质中的传播应采用麦克斯韦方程, 但考虑到耦合, 求解这样一组微分方

程组非常复杂。在几何光学近似下, 如果液晶介质的长度大于光波的波长, 不考虑能量的衰减, 激光在液晶介质中的传输可以利用下面的进动方程描述^[10], 其中 e 为椭圆偏振光的偏振椭圆率, Ψ 为椭圆偏振激光偏振长轴与 X 轴的夹角, ω 为激光圆频率, Δn 为液晶介质的折射率差:

$$\frac{d\mathbf{s}}{dz} = \boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{s}$$

$$\mathbf{s} = (s_1, s_2, s_3) = \{(1 - e^2)^{1/2} \cos(2\Psi), (1 - e^2)^{1/2} \sin(2\Psi), e\}$$

$$\boldsymbol{\Omega} = (\omega/c) \Delta n \{\cos(2\theta), \sin(2\theta), 0\} \quad (2)$$

E. Santamato 等人利用经典分析力学的拉格朗日量对这个问题进行了研究, 式(2)可以简化为式(3)的形式^[9], 同时式(1)可以变化为式(4)的形式:

$$\frac{d\Psi}{dz} = (-\omega/2c) \Delta n [e/(1 - e^2)^{1/2}] \cos[2(\Psi - \theta)]$$

$$\frac{de}{dz} = (\omega/c) \Delta n (1 - e^2)^{1/2} \sin[2(\Psi - \theta)] \quad (3)$$

$$k_{22} \frac{d^2\theta}{dz^2} + \left(\frac{1}{c}\right) \Delta n (1 - e^2)^{1/2} \sin[2(\Psi - \theta)] = 0 \quad (4)$$

3 结果与讨论

取液晶的扭曲弹性常数 $k_{22} = 5 \times 10^{-12}$ N, 激光入射波长 $\lambda = 1.06 \mu\text{m}$, 液晶盒边界强锚定, 讨论不同入射情况下强激光在各向异性液晶介质中的传输。

3.1 激光诱导平行排列液晶指向矢偏转的阈值效应

如图1所示, 当 $\Psi_0 = \pi/2$ 时, 入射光光电场与液晶材料初始指向矢方向相互垂直, 此时入射光对平行排列向列相液晶的光致扭矩作用为:

$$\Gamma_E = \frac{\Delta\epsilon}{2} (\mathbf{n} \times \mathbf{E})(\mathbf{n} \cdot \mathbf{E}) = 0 \quad (5)$$

可以看到, 光波正入射, 理论上无论入射光强多少, 光致扭矩为0, 都不会发生液晶指向矢的偏转。但实际中液晶指向矢的分布是一个宏观统计概念, 存在一个涨落效应, 当入射光达到一定强度后, 指向矢极小角度的涨落可以引起指向矢的偏转。下面对这个阈值光强进行讨论, 假设指向矢偏转角 θ 是一个小量, 忽略对激光偏振态的影响, 考虑黏滞弛豫项, 式(4)可以写为:

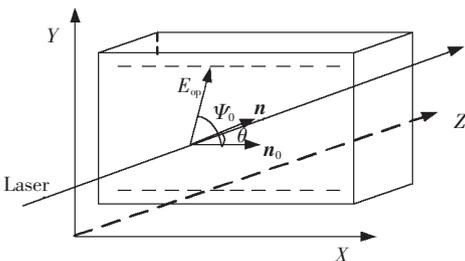


图1 平面波激光正入射在平行排列液晶表面

Fig. 1 Interaction between the normal incident plane wave and the liquid crystal

$$k_{22} \frac{d^2 \theta}{dz^2} + \frac{2I}{c} \Delta n \theta = \gamma \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (6)$$

这是一个抛物线形偏微分方程,根据边界强锚定条件,取试探解 $\theta(z, t) = \theta_q(t) \sin(q\pi z/L)$, q 为自然数时可以满足边界条件,代入式(6)有:

$$-\frac{q^2 \pi^2}{L^2} \theta_q(t) + \frac{2I \Delta n}{k_{22} c} \theta_q(t) = \frac{\gamma}{k_{22}} \frac{d\theta_q(t)}{dt} \quad (7)$$

$$\theta_q(t) = \theta_q(0) \exp \left[\frac{k_{22}}{\gamma} \left(\frac{2I \Delta n}{k_{22} c} - \frac{q^2 \pi^2}{L^2} \right) t \right] \quad (8)$$

$\theta_q(0)$ 为初始时刻涨落引起的液晶指向矢的一定偏转。当满足条件: $\frac{k_{22}}{\gamma} \left(\frac{2I \Delta n}{k_{22} c} - \frac{q^2 \pi^2}{L^2} \right) > 0$ 时,涨落扰动可以呈指数增长,即发生液晶指向矢的转动,相应 $q=1$ 时指向矢发生转动的阈值最小,故阈值可取为:

$$I_{\text{threshold}} = \frac{k_{22} c \pi^2}{2 \Delta n L^2} \quad (9)$$

根据 S. D. Durbin 的实验与理论分析结果^[11],当 Ψ_0 偏离 $\pi/2$ 后,相应的阈值光强会大大降低。

上述讨论是在小角近似下对激光诱导液晶指向矢偏转的阈值光强进行推导。当光强稍大于阈值光强时,小角近似条件不再满足,式(6)不再成立,因此需要对式(3)与式(4)联立进行数值求解。下面考虑液晶盒的厚度 L 与入射激光的波长 λ 满足 $\Delta n L = \lambda/4$ 时,取液晶材料 $\Delta n = 0.052$, $L = 5 \mu\text{m}$,激光诱导指向矢转动的分布如图 2(a) 所示,当光强达到 10^8 W/cm^2 时,液晶指向矢几乎转动 90° 沿入射激光偏振方向排列。图 2(b) 所示为寻常光沿 z 轴在液晶介质中传播时由于指向矢转动产生的位相延迟,横坐标取为光强值的自然对数,相应光强单位为 W/cm^2 。可以看到,当光强小于 $1.1 \times 10^6 \text{ W/cm}^2$ 时位相延迟为零,即指向矢未发生转动;当光强大于 $1.1 \times 10^6 \text{ W/cm}^2$ 时,位相延迟开始陡增,直至最终位相延迟达到 $\pi/2$ 。可知指向矢发生转动的阈值光强为 $1.1 \times 10^6 \text{ W/cm}^2$ 。这与从式(6)得到的阈值光强 $0.8 \times 10^6 \text{ W/cm}^2$ 有一定偏差,除了数值计算所带来的误差外,进行式(3)的推导时没有考虑液晶指向矢转动对光致扭矩的影响是主要原因。

下面考虑液晶层厚度对于激光诱导指向矢转动阈值光强的影响。分别取液晶材料 $L = 25, 5, 1 \mu\text{m}$, 相应的 Δn 分别为 $0.0104, 0.052, 0.26$, $\Psi_0 = 90^\circ$, 其他液晶参数不变。由数值计算结果可以看到随着液晶层厚度的增加,阈值光强分别为

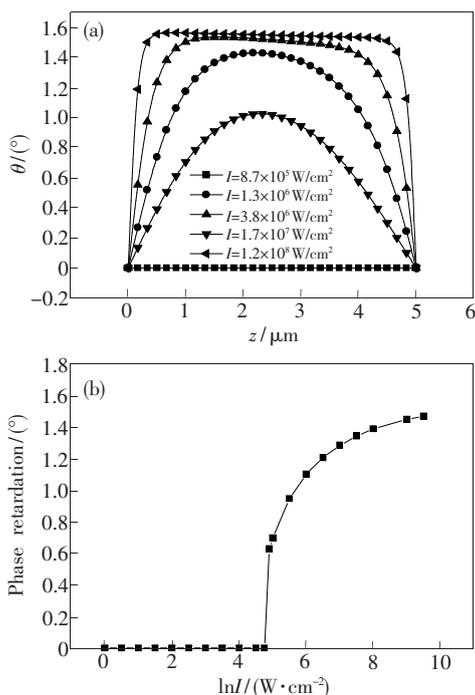


图 2 $L = 5 \mu\text{m}$, $\Delta n = 0.052$, (a) 不同光强作用下激光诱导指向矢转动角的分布; (b) 指向矢转动后,寻常光沿 z 轴传播时产生的位相延迟随光强的变化关系。

Fig. 2 $L = 5 \mu\text{m}$, $\Delta n = 0.052$, (a) dependence of the laser induced reorientation distribution on the intensity; (b) dependence of the phase retardation on the laser intensity.

$3 \times 10^6 \text{ W/cm}^2, 1 \times 10^6 \text{ W/cm}^2, 1 \times 10^5 \text{ W/cm}^2$, 即液晶层厚度的减小可以有效提高激光诱导指向矢转动的阈值光强。

3.2 入射光偏振态对激光诱导指向矢转动的影响

图 3(a) 所示为入射光 $e_0 = 0$, 光强 $I = 2 \times 10^5 \text{ W/cm}^2$, 而其偏振长轴与 x 轴夹角不同时, 即分别取 Ψ_0 角为 $\pi/8, \pi/4, 3\pi/4, \pi/2$, 得到的激光诱导液晶指向矢转动的分布。可见, 在相同入射光强的条件下, Ψ_0 角越大, 液晶指向矢转动的角度越大, 这是由于大的 Ψ_0 角产生大的光致扭矩。图 3(b) 所示为相应的光波偏振椭圆率在液晶中的分布。图 4(a) 所示为取入射光 Ψ_0 角为 $\pi/4$ 时, 偏振椭圆率 e_0 分别为 $0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8$ 时, 激光诱导指向矢转动的分布。图 4(b) 所示为相应的光波偏振椭圆率在液晶中的分布。由图 4(a) 可见, 当入射光椭圆率 e_0 从 $0 \sim 0.4$ 变化时, 指向矢转动的最大角度减小, 同时出现最大转动

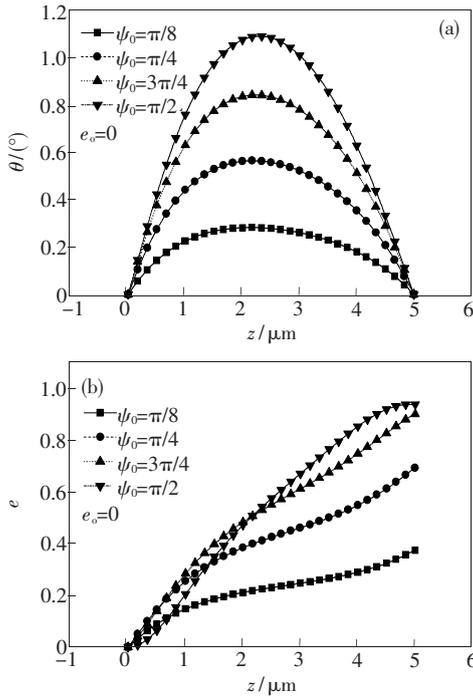


图 3 入射光强 $I = 2 \times 10^5 \text{ W/cm}^2$, $e_0 = 0$, Ψ_0 取不同值时, (a) 激光诱导指向矢转动角度的分布; (b) 激光偏振椭圆率 e 的变化。

Fig. 3 $I = 2 \times 10^5 \text{ W/cm}^2$, $e_0 = 0$, (a) dependence of laser induced reorientation distribution on Ψ_0 of incident laser; (b) dependence of the ellipticity parameter of the laser on Ψ_0 .

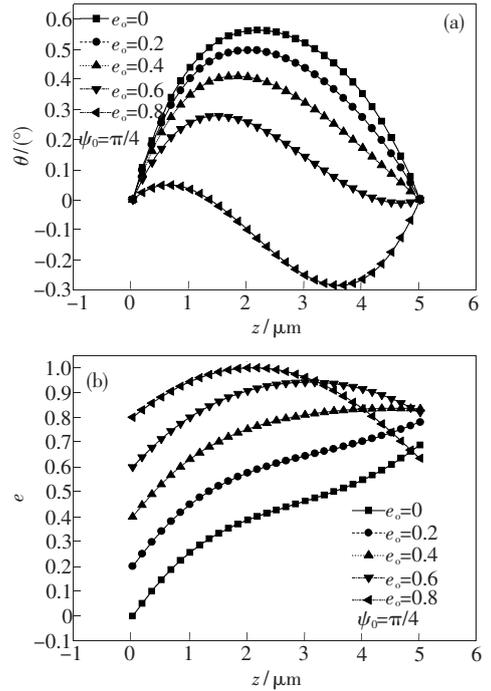


图 4 入射光强 $I = 2 \times 10^5 \text{ W/cm}^2$, $\Psi_0 = \pi/4$, e_0 取不同值时, (a) 激光诱导指向矢转动角度的分布; (b) 激光偏振椭圆率 e 的变化。

Fig. 4 $I = 2 \times 10^5 \text{ W/cm}^2$, $\Psi_0 = \pi/4$, (a) dependence of laser induced reorientation distribution on e_0 of incident laser; (b) dependence of the ellipticity parameter of the laser on e_0 .

角的空间位置向入射面移动。入射光椭圆率为 0.6 和 0.8 时, 指向矢转动的方向出现了负值。根据式(1), 由图 4(b) 可知, 这是由于激光在液晶中传输时, 椭圆率出现拐点, 其光致扭矩的方向发生变化, 造成指向矢转动的方向产生变化。

3.3 激光诱导指向矢转动对光波偏振态的影响

图 5(a) 所示为液晶层厚度 $L = 5 \mu\text{m}$, $\Delta n = 0.052$, $\Psi_0 = \pi/4$ 时, 不同光强作用下, 激光诱导液晶指向矢转动的分布。当光强达到 $2 \times 10^4 \text{ W/cm}^2$ 时, 其指向矢最大转动角度可达 0.03° ; 光强为 $2 \times 10^5 \text{ W/cm}^2$ 时, 指向矢转动的最大角度可以达到 0.15° ; 当光强达到 $7 \times 10^7 \text{ W/cm}^2$ 时, 液晶指向矢几乎转动 45° 沿入射激光偏振方向排列。图 5(b) 所示为不同光强激光在液晶中传输时, 光波 ψ 角的变化。在激光出射端 ($z = 5 \mu\text{m}$), 随着光强的增加, ψ 角先变大, 光强大于 $2 \times 10^5 \text{ W/cm}^2$ 后, 开始减小。图 5(c) 所示为不同光强激光在液晶介质中传播时其偏振椭圆率 e 在液晶中

的分布。

由图 5 可知, 光强为 $1 \times 10^4 \text{ W/cm}^2$ 时, 出射面激光的偏振椭圆率为 1, 激光的 Ψ 角则由入射时的 $\pi/4$ 减小为 0.65; 当光强为 $2 \times 10^5 \text{ W/cm}^2$ 时, 出射面激光的椭圆率为 0.98, 而其 Ψ 角由入射时的 $\pi/4$ 减小为 0.2; 光强进一步达到 $7 \times 10^7 \text{ W/cm}^2$ 时, 出射面激光的椭圆率为 0.24, 而其 Ψ 角则由入射时的 $\pi/4$ 减小为 0.76。可见随着激光光强的增加, 在液晶介质中传输的激光出射后偏振椭圆率逐渐降低, 而激光 Ψ 角则先变小, 光强达到 $2 \times 10^5 \text{ W/cm}^2$ 后又开始增加。入射光强较小时, 几乎不引起液晶指向矢的转动; 当光强达到 10^7 W/cm^2 量级时, 液晶指向矢发生转动, 几乎沿入射激光的偏振方向均匀排列, 这两种情况都对光波的 Ψ 角变化影响较小; 而当光强介于两者之间时, 激光诱导指向矢转动的空间梯度较大, 此时对于光波 Ψ 角的变化影响也较大。

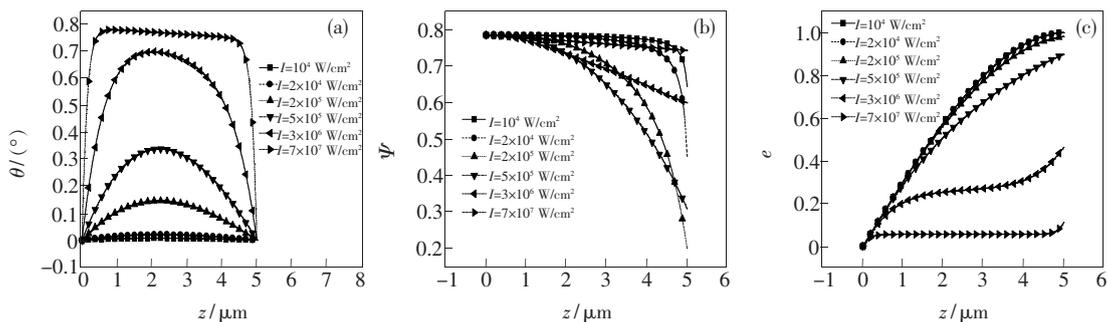


图 5 $L=5 \mu\text{m}$, $\Delta n=0.052$, $\psi_0=\pi/4$, 不同入射光强下, (a) 激光诱导指向矢转动角度的分布; (b) 激光 Ψ 参数的变化; (c) 激光偏振椭圆率 e 的变化。

Fig. 5 $L=5 \mu\text{m}$, $\Delta n=0.052$, $\Psi_0=\pi/4$, (a) dependence of the laser induced reorientation distribution on intensity; (b) dependence of the Ψ parameter on laser intensity; (c) dependence of the laser e parameter on intensity.

4 结 论

通过数值求解欧拉-拉格朗日方程与光线传输方程, 明确了激光与液晶相互作用诱导指向矢转动的物理机制, 讨论了激光诱导指向矢转动的阈值问题, 发现阈值光强与液晶盒厚度成反比关

系。相同光强下, 比较了入射激光偏振态对于激光诱导指向矢转动的影响, 发现入射激光的 Ψ_0 参数仅对指向矢转动的幅值影响较大, 而入射激光的偏振椭圆率 e_0 对指向矢转动的影响则较为复杂。最后讨论了强激光在液晶中传输时, 出射激光的偏振态对入射光强的依赖关系。

参 考 文 献:

- [1] Simoni F, Francescangeli O. Effect of light on molecular orientation of liquid crystals [J]. *J. Physics: Condensed Matter*, 1999, 11(41):R439-R487.
- [2] 陈世伟, 钟鸣, 任刚. 无外场作用下扭曲排列 E7 的简并四波混频研究 [J]. *液晶与显示*, 2008, 23(2):127-131.
- [3] 关荣华. 表面弹性能 K_{24} 项对液晶盒指向矢分布的影响 [J]. *液晶与显示*, 2008, 23(5):530-535.
- [4] Khoo I C. Nonlinear optics of liquid crystalline materials [J]. *Physics Report*, 2009, 471(5):221-267.
- [5] Simoni F. *Nonlinear Optical Properties of Liquid Crystals and PDLC* [M]. Singapore: World Scientific, 1997: 68-83.
- [6] Khoo I C. *Liquid crystals: Physical Properties and Nonlinear Optical Phenomena* [M]. New York: John Wiley, 1995: 121-132.
- [7] 石海兵, 黄子强. 低阈值电压聚合物网络液晶光电特性的研究 [J]. *液晶与显示*, 2008, 23(1):21-25.
- [8] Eichler H J, Macdonald R. Flow alignment and inertial effect in picosecond laser induced reorientation phenomena of nematic liquid crystals [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1991, 67(19):2666-2669.
- [9] Santamato E, Abbate A, Maddalena P. Interaction of liquid crystals with electromagnetic fields; Mauguin theorem, angular momentum conservation, and optical freedericksz transitions in twisted nematic liquid crystals [J]. *Phy. Rev. A*, 1988, 38(8):4323-4329.
- [10] Abbate G, Santamato E, Maddalena P. Optical freedericksz transitions in twisted planar nematics [J]. *Nuovo Cimento*, 1988, 10(3):313-322.
- [11] Durbin S D, Arakelian S M, Shen Y R. Optical field induced birefringence and freedericksz transition in a nematic liquid crystal [J]. *Phys. Review Lett.*, 1981, 47(19):1411-1414.