

文章编号: 1007-2780(2010)05-0661-05

强激光诱导液晶衍射环现象的实验与数值研究

赵祥杰, 骆永全, 王海峰, 罗 飞, 刘海涛, 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: zxdouble@163.com)

摘 要: 强激光在液晶材料中传输时易诱导非线性效应, 这种非线性效应对液晶器件光学性能有一定影响。高斯光束通过平行排列的 5CB 液晶材料后产生自衍射图像, 利用高速相机对不同光强的 532 nm 激光通过 5CB 液晶后的衍射图样成像, 获得了从激光作用瞬间到液晶温度达到清亮点附近时衍射图样的变化过程。通过衍射图样对液晶材料光致折射率变化的性质进行了分析。利用基尔霍夫衍射积分公式数值模拟研究了相应强度 532 nm 高斯光束通过非线性液晶材料后在衍射屏上的衍射图样, 并与实验结果进行了对比, 定性分析了液晶非线性对液晶器件性能的影响。

关 键 词: 非线性光学; 向列相液晶; 衍射环; 基尔霍夫衍射积分; 光致折射率变化

中图分类号: O734⁺.1 **文献标识码:** A

Propagation of High Power Laser Beam in Nematic Liquid Crystal and Its Diffraction Ring Effect

ZHAO Xiang-jie, LUO Yong-quan, WANG Hai-feng,

LUO Fei, LIU Hai-tao, ZHANG Da-yong

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

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

Abstract: High power laser induced nonlinear optical effects in liquid crystal are prone to deteriorate the optical properties of liquid crystal device. The self diffraction phenomenon was observed when high power Gaussian profile laser beam propagate in 5CB liquid crystal, which was taken by high speed camera. The dynamical evolution of the diffraction phenomenon was studied to analyze the nonlinear optical properties of the liquid crystal. Kirchhoff's diffraction integral was applied to study the diffraction rings induced by Gaussian profile laser beam propagating in self-defocusing medium numerically. The comparison of experimental result with theoretical result elucidates the nonlinear effect of liquid crystal.

Key words: nonlinear optics; nematic liquid crystal; diffraction rings; Kirchhoff's diffraction integral; optical-induced refractive index change

1 引 言

平行排列向列相液晶光电器件目前已广泛应用于强激光研究领域。液晶材料的非线性系数较

大^[1-3], 容易在液晶材料中诱导产生非线性效应。这种非线性效应在一定情形下会影响液晶器件光学性能, 例如在强激光作用下液晶器件折射率的变化以及光致双折射现象等, 因此有必要分析强

收稿日期: 2010-03-03; 修订日期: 2010-03-30

基金项目: 中国工程物理研究院科学技术发展基金资助项目 (No. 2007A01003, No. 2010B0401049)

作者简介: 赵祥杰 (1984—), 男, 黑龙江穆棱人, 硕士, 主要从事液晶物理与器件以及飞秒超快光谱的研究。

激光作用下液晶非线性对液晶器件光学性能的影响。自从 A. S. Zolot'ko 与 S. Durbin 等人分别报道了激光在液晶中传输引起的衍射环现象后^[4-5],这种自衍射现象逐渐成为研究液晶材料的非线性性质的一种有效手段^[6-7]。当液晶与连续激光或宽脉冲激光相互作用时,激光诱导热效应是液晶材料中光致折射率变化最为重要的一种原因,温度一定时,这种热效应诱导的非线性系数与光强成正比^[8]。

本文利用高功率密度 532 nm 连续激光与 5CB 液晶材料相互作用产生的自衍射现象来研究平行排列的 5CB 液晶盒的光致折射率变化性质,基于基尔霍夫衍射积分公式进行数值模拟研究了自衍射的光斑形状与入射光强的关系,并与实验结果进行了对照。

2 实验与理论分析

图 1 为研究中使用的实验装置示意图。532 nm 激光经全反镜反射后由焦距为 10 cm 的透镜聚焦在 5CB 液晶材料表面。液晶盒上下基底玻璃板厚度为 1 mm,液晶盒厚为 20 μm。聚焦激光经液晶传输后入射在接收白屏上,接收白屏到液晶盒的距离为 410 mm。高速相机对接收白屏上的光斑成像并采集,采集曝光时间为 0.1 ms,采集速率为 2 000 帧/s。实验前对未灌注液晶的空盒进行了测试,没有观测到衍射环现象,因此排除了基底玻璃板的信号干扰。为了尽可能地避免激光诱导液晶指向矢转动对于液晶三阶非线性系数的影响,旋转液晶盒,使得液晶指向矢排列方向平行于激光偏振方向。使用刀口法测量了样品盒处的激光光斑大小为 100 μm。

根据 Khoo 的理论^[9],高斯光束的光强可以用式(1)表达:

$$I(r) = I_0 \exp\left(-\frac{2r^2}{\omega^2}\right)$$
 (1)

利用菲涅尔衍射积分公式,高斯光束经非线性介质后在远场接收屏上的光斑分布可以用基尔霍夫衍射积分公式表达:

$$I(r_1, z) = \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^2 I_0 \left| \int_0^\infty r dr J_0\left(k_0 \frac{rr_1}{2z}\right) \times \exp\left\{-2\frac{r^2}{\omega^2} - i[\phi_L(r) + \phi_{NL}(r)]\right\} \right|^2$$
 (2)

其中 $r_1 = (x^2 + y^2)^{1/2}$ 为远场接收面上场点到光轴的距离, z 为激光出射面到远场接收面的距离, r 为激光出射面上场点到光轴的距离, λ 为激光波长, ω 为高斯光束束腰, $\phi_L(r)$ 和 $\phi_{NL}(r)$ 分别代表高斯光束的衍射相位因子和与光强相关的非线性相位因子。

$$\phi_L(r) = \frac{2\pi}{\lambda} \left(\frac{\rho^2}{2z} + \frac{\rho^2}{2R} \right)$$

$$\phi_{NL}(r) = k_0 d \Delta n(r)$$
 (3)

其中 d 为液晶盒厚度, R 为激光出射面处高斯光束的曲率半径, $\Delta n(r)$ 为强激光诱导的折射率变化,仅考虑三阶非线性效应,

$$\Delta n(r) = n_2 I(r)$$
 (4)

当激光偏振方向平行于向列相液晶指向矢时,其三阶非线性系数 n_2 为负,即相当于自散焦介质^[10]。

3 实验结果与分析

图 2 所示为连续激光与液晶作用瞬间,在不同功率密度激光入射时,聚焦激光经液晶后在远场接收屏上的衍射光斑形状。可以看到,当入射激光功率密度为 10 kW/cm² 时,没有看到明显的衍射环现象;当激光功率密度增加到 23 kW/cm² 时,光斑出现一个暗环,同时光斑中心较亮,即出现一个衍射环,光斑直径变大;当入射激光功率密度达到最大 36 kW/cm² 时,可以看到光斑的外围暗环仍然存在,暗环包围的中心亮斑的亮度明显减弱,同时光斑最中心处几乎出现一个暗点,光斑直径达到最大。

这种衍射环的环数可以由式(5)粗略估计:

$$\phi(0) - \phi(\infty) = N \times 2\pi$$
 (5)

其中, N 为整数, $\phi(0)$ 与 $\phi(\infty)$ 分别代表液晶材料处光斑横截面中心点相位延迟与无穷远处的相位延迟量。由图 2(b)可知,在入射激光功率密度为

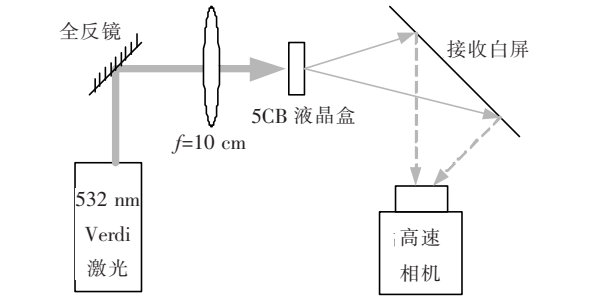


图 1 实验装置示意图
Fig. 1 Schematic of our experimental setup

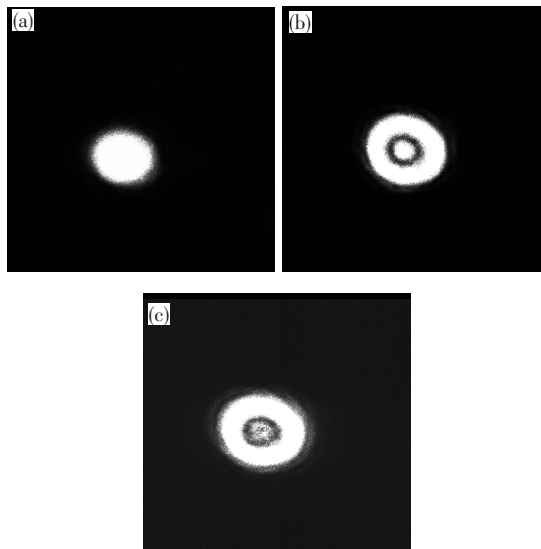


图 2 入射激光功率密度分别为(a) 10 kW/cm², (b) 23 kW/cm², (c) 36 kW/cm² 时远场衍射光斑图样.
Fig. 2 Far-field ring pattern when incident laser intensity is (a) 10 kW/cm², (b) 23 kW/cm², (c) 36 kW/cm².

23 kW/cm² 时,光斑中心与无穷远处相位延迟量之差约为 2π 。

随着激光与液晶材料相互作用时间的增长,液晶温度逐渐上升,进而液晶材料的非线性折射率系数随温度升高而增大,相应地可以看到远场接收屏上的衍射光斑环数增加;当温度接近液晶材料的清亮点温度时,光斑衍射环数停止增加。另外,由于温度的剧烈作用,向列相液晶的有序参量被极大地破坏,激光继续作用时,液晶温度超过清亮点温度,由各向异性的平行排列方式转化为各向同性的分布,此时液晶非线性系数变小,光斑的衍射环纹开始向内收缩。根据这种现象,我们利用高速相机捕捉的远场衍射环随激光作用时间的变化,可以判断当液晶温度接近液晶清亮点时高斯光束的衍射光斑形状如图 3 所示。

可以看到,此时衍射光斑中心为一亮点,外围存在两个环形亮带,其中内环较暗弱,外环较亮,集中较大的激光能量。

根据 J. J. Wu 等人对于高斯光束通过非线性介质产生衍射环的分析,衍射环的出现是由于高斯光束通过非线性介质后产生的自相位调制结果^[11]。强激光在液晶中传播时,由于非共振吸收的存在以及电致伸缩作用,液晶的温度与密度会

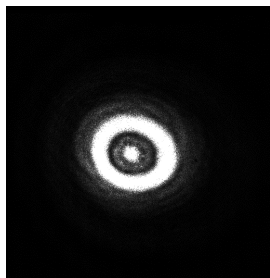


图 3 液晶温度接近清亮点时,远场衍射光斑图样,入射激光功率密度 23 kW/cm²。

Fig. 3 Far-field ring pattern near clear-temperature of 5CB liquid crystal, the incident laser intensity is 23 kW/cm².

相应受到激光的调制,对于连续激光作用下的稳态情况,热效应占主导地位。在一定功率密度下,热效应诱导的温度变化正比于入射激光功率密度,因此这种激光与非线性介质的相互作用仅考虑三阶非线性作用。当入射激光功率密度达到一定阈值时,入射高斯光束中心相位延迟与边缘相位延迟的差值达到 2π 以上时,由于相位因子相干相消的原因,远场会出现衍射环的现象。另外,由于激光偏振方向平行于 5CB 液晶指向矢,液晶对激光的折射率随温度增加而递减,这种热效应诱导的非线性介质可以视为自散焦介质^[12],即式(4)中的 n_2 为负。高斯光束远场衍射环的环数近似正比于中心相位延迟与无穷远处相位延迟的差值,根据关系式(5)可以估算 5CB 液晶材料的非线性折射率系数

$$n_2 \propto -10^{-6} \text{ cm}^2/\text{W} \quad (6)$$

4 数值模拟结果与讨论

为了验证上述分析,并利用数值模拟定性分析液晶材料的非线性折射率系数,我们利用基尔霍夫衍射积分公式进行数值模拟,与实验结果进行了比对。

数值模拟计算参数取为如下: $n_2 = -0.95 \times 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{W}$, $d = 20 \text{ }\mu\text{m}$, $z = 410 \text{ mm}$, $\lambda = 532 \text{ nm}$, 高斯光束束腰 $\omega = 100 \text{ }\mu\text{m}$ 。取入射激光功率为 10, 23, 36 kW/cm², 稳态情形下远场衍射光斑的光强分布分别如图 4、图 5 和 图 6 所示。

从计算结果可以看到,随着入射激光功率密度的增加,衍射光斑直径变大,光斑内部出现暗环,与实验结果符合较好。当液晶温度接近清亮

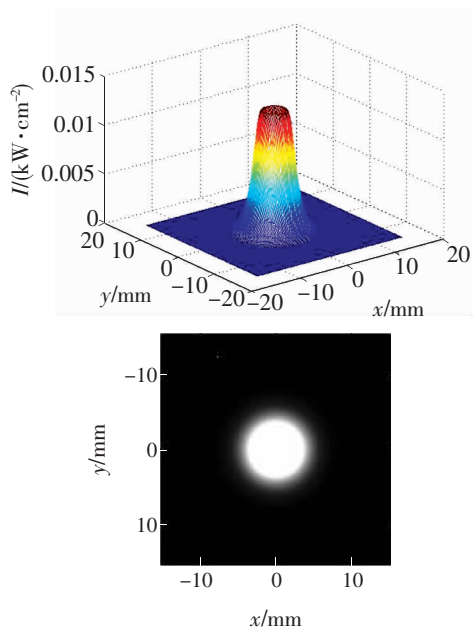


图 4 激光功率密度 10 kW/cm^2 , $n_2 = -0.95 \times 10^{-6}\text{ cm}^2/\text{W}$, 远场衍射光斑的 (a) 三维立体分布; (b) 二维平面分布.

Fig. 4 Laser intensity 10 kW/cm^2 , $n_2 = -0.95 \times 10^{-6}\text{ cm}^2/\text{W}$, the far-field intensity distribution by numerical research. (a) 3-dimensional ; (b) 2-dimensional.

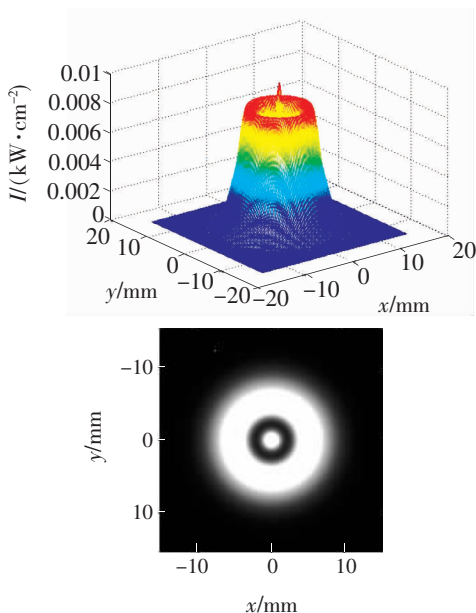


图 5 激光功率密度 23 kW/cm^2 , $n_2 = -0.95 \times 10^{-6}\text{ cm}^2/\text{W}$, 远场衍射光斑的 (a) 三维立体分布; (b) 二维平面分布.

Fig. 5 Laser intensity 23 kW/cm^2 , $n_2 = -0.95 \times 10^{-6}\text{ cm}^2/\text{W}$, the far-field intensity distribution by numerical research . (a) 3-dimensional; (b) 2-dimensional.

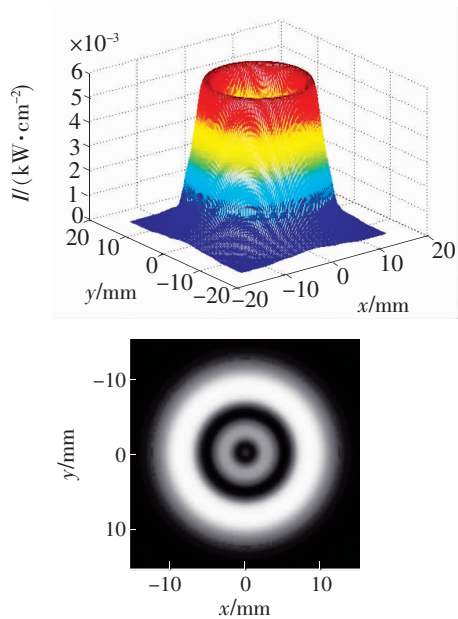


图 6 激光功率密度 36 kW/cm^2 , $n_2 = -0.95 \times 10^{-6}\text{ cm}^2/\text{W}$, 远场衍射光斑的 (a) 三维立体分布; (b) 二维平面分布.

Fig. 6 Laser intensity 36 kW/cm^2 , $n_2 = -0.95 \times 10^{-6}\text{ cm}^2/\text{W}$, the far-field intensity distribution by numerical research. (a) 3-dimensional; (b) 2-dimensional.

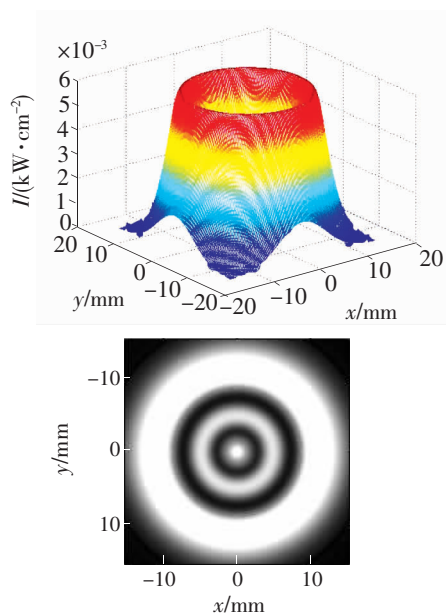


图 7 激光功率密度 23 kW/cm^2 , $\alpha_2 = -3.53 \times 10^{-6}\text{ cm}^2/\text{W}$, 远场衍射光斑的 (a) 三维立体分布; (b) 二维平面分布.

Fig. 7 Laser intensity 23 kW/cm^2 , $\alpha_2 = -3.53 \times 10^{-6}\text{ cm}^2/\text{W}$, the far-field intensity distribution by numerical research . (a) 3-dimensional ; (b) 2-dimensional.

点温度时,非线性系数增大,因此利用基尔霍夫衍射积分公式描述远场光斑形状时,需要改变液晶材料的非线性系数。根据前述分析,取 $n_2 = -3.53 \times 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{W}$,其他液晶参数不变,可以得到高斯光束通过自散焦液晶介质后远场光斑分布,如图 7 所示。

与图 3 的实验结果比较可以看到,数值计算结果基本符合实验结果。由此可知,在液晶温度接近于液晶材料本身清亮点温度时,其三阶非线性系数约为室温时的 3.7 倍。据此可以对强激光在液晶器件中传输时引起的非线性影响进行估算。当 5CB 向列相液晶与强激光相互作用而不发生“清亮”时,随作用时间的增长,其非线性系数逐渐从初始室温时的 $-0.95 \times 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{W}$ 增加

到清亮点温度附近的 $-3.53 \times 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{W}$ 。液晶在清亮点附近大的非线性系数的存在,一是由于液晶温度的升高,另外主要是因为清亮点附近折射率对温度的一阶导数较大。

5 结 论

高斯光束在液晶介质中传输时产生自衍射现象,利用这种现象分析了激光与液晶作用瞬间以及液晶温度接近清亮点附近时 5CB 液晶材料的非线性性质。利用基尔霍夫衍射积分公式对这种自衍射现象进行了数值模拟,数值模拟结果与实验结果有很好的符合,定性分析了激光诱导热效应对于液晶材料非线性性质的贡献。

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):439-487.
- [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] 任常愚,孙秀冬,孙飞,等. 向列相液晶中的耦合自相位调制现象[J]. *液晶与显示*, 2006, 21(2):95-98.
- [4] Durbin S D, Arakelian S M, Shen Y R. Laser induced diffraction rings from a nematic liquid crystal film [J]. *Optics Lett.*, 1981, 6(9):411-413.
- [5] Zolot'ko A S, Kitaeva V F, Kroo N, *et al.* Light induced Fredericksz transition in an MBBA crystal[J]. *JEPT Lett.*, 1981, 34(5):250-254.
- [6] 张大勇,刘仓理,李剑峰,等. 染料激光同液晶的非线性光学效应研究[J]. *应用激光*, 2006, 26(3):172-174.
- [7] Khoo I C, Shen Y R. Liquid crystals-nonlinear optical properties and processes [J]. *Optical Engineering*, 1985, 24(4):579-585.
- [8] Khoo I C, Hou J Y, Din G L, *et al.* Laser induced thermal, orientational and density nonlinear optical effects in nematic liquid crystals[J]. *Phys. Rev. A*, 1990, 42(2):1001-1004.
- [9] Khoo I C, Hou J Y, Liu T H, *et al.* Transverse self-phase modulation and bi-stability in the transmission of a laser beam through a nonlinear thin film [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1987, 4(6):886-891.
- [10] Khoo I C. Nonlinear optics of liquid crystalline materials [J]. *Physics Report*, 2009, 471(5):221-267.
- [11] Wu J J, Chen S H, Fan J Y, *et al.* Propagation of a Gaussian profile laser beam in a nematic liquid crystals and the structure of its nonlinear diffraction rings [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1990, 7(6): 1147-1157.
- [12] Khoo I C. *Liquid Crystals Physical Properties and Nonlinear Optical Phenomena* [M]. New York:John Wiley, 1995: 154-166.