

文章编号:1007-2780(2016)06-0547-06

弱磁场中向列相液晶 TEB30A 薄膜自衍射现象研究

刘桂香,王雁冰*

(内蒙古科技大学 包头师范学院, 内蒙古 包头 014030)

摘要:采用 1.5 mW 低功率的 He-Ne 激光(632.8 nm)正入射向列相液晶 TEB30A 薄膜,研究向列相液晶 TEB30A 薄膜在不同强度的弱磁场(0,0.464 9、0.506 2 和 0.518 5 T)中的远场衍射特性。实验结果表明,向列相液晶 TEB30A 薄膜在 4 种不同强度的弱磁场(0,0.464 9、0.506 2 和 0.518 5 T)中都能产生远场衍射。衍射图样会随磁场强度的增加而发生明显的变化。衍射环的数目增加,衍射环宽度变宽,衍射场向外拓展。当磁场强度为 0.506 2 T 时,衍射环上出现了近似相互平行的干涉直条纹。当磁场强度达到 0.518 5 T 时,干涉直条纹更加明显的趋于平行。在弱磁场的作用下,激光束在远场的散度变得明显。基于 Kirchhoff-Fraunhofer 衍射积分原理的理论模拟结果表明,当激光通过处在弱磁场中的向列相液晶 TEB30A 薄膜时,横向非线性相移会增大。随着弱磁场强度由 0 T 增加到 0.518 5 T,非线性相移也由 4π 增加到 20π 。弱磁场引起样品非线性相移增大,导致其远场衍射图样发生了变化。远场衍射光强图样的变化也是透射光能量分布的改变,因此,可将弱磁场调控向列相液晶这一技术应用于磁控光开关及光限幅等领域。

关键词:低功率;正入射;向列相液晶 TEB30A 薄膜;弱磁场;衍射

中图分类号:O436 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/YJYXS20163106.0547

Self-diffraction effect of nematic liquid TEB30A film in weak magnetic field

LIU Gui-xiang, WANG Yan-bin*

(Baotou Teacher College, Inner Mongolia University of Science and Technology,
Baotou 014030, China)

Abstract: The far-field diffraction characteristics was studied in the different weak magnetic fields(0, 0.464 9, 0.506 2 and 0.518 5 T) with the low power He-Ne laser of 1.5 mW(632.8 nm) being normal incident on the film of nematic liquid crystals TEB30A. The experiment results showed that the film of nematic liquid crystals TEB30A can produce diffraction in the four weak magnetic fields of 0, 0.464 9, 0.506 2 and 0.518 5. The diffraction pattern could obviously be changed with the increasing of the magnetic strength. The number of diffraction rings increased, the width of diffraction rings became wide, and the diffraction field expanded outward. At the magnetic strength of 0.506 2 T, the interference stripes appeared on the diffracting rings. While the magnetic strength increased to 0.518 5 T, the interference stripes was becoming parallel. Under the effect of the weak magnetic field, the diver-

收稿日期:2016-02-27;修订日期:2016-03-11.

基金项目:内蒙古自治区教育厅科学研究项目(No. NJZY12203)

Supported by Scientific Research Projects of Department of Education of Inner Mongolia Autonomous Region(No. NJZY12203)

* 通信联系人, E-mail: Wangbing13947@sina.com

gence of the laser beam was changed drastically in the far-field. Based on the Kirchhoff - Fraunhofer diffraction integral, the theoretical simulation results showed that, when the laser beam passed through the film of nematic liquid crystals TEB30A in the weak magnetic field, the transverse nonlinear phase would increase. With the weak magnetic strength increasing from 0 T to 0.518 5 T, the nonlinear phase increased from 4π to 20π . The weak magnetic field caused the nonlinear phase, resulting in the change of the far-field diffraction pattern. The change of the far-field diffraction pattern is also the change of the distribution of the transmitted light energy. Therefore, the technology of the weak magnetic field modulating the nematic liquid crystals can be applied to the areas of magnetic-optical switch and magnetic-optical limiters.

Key words: low power; normal incident; the film of nematic liquid crystals TEB30A; weak magnetic field; diffraction

1 引言

众所周知,向列相液晶具有很强的光学各向异性,是很好的非线性光学材料。大量的研究已表明,在光的作用下,向列相液晶会产生各种非线性光学效应^[1-5]。自从 1980 年 A. S. Zolot'ko^[6]首先发现汇聚光束通过向列相液晶产生同心圆环的衍射图样后,研究人员采用各种技术方法对向列相液晶的衍射效应进行实验和理论研究分析。如,1981 年, S. D. Durbin 等^[7]对向列相液晶薄膜的衍射效应研究中发现,当垂直入射到垂直排列的向列相液晶 5CB 薄膜上的光强超过某一特定值时,会在远场处观察到同心衍射圆环,并对圆环的形成、数量以及最大衍射角等给出定性的解释,认为这是一种空间自相位调制现象。E. Santamato 和 F. Bloisi 等^[8-9]利用 Kirchhoff-Fraunhofer 衍射积分方法,从理论上系统地研究分析了这种自衍射效应,认为衍射圆环是两种衍射叠加而产生的,即圆孔衍射与非线性衍射叠加。H. Hsiung 等^[10]研究液晶的 kerr 非线性光学效应时发现,纳秒脉冲激光正入射向列相液晶,会使液晶分子重新取向,当给液晶加上强的磁场时,液晶分子也会重新取向。1986 年, I. C. Khoo 和 G. M. Finn 等^[11]基于 Kirchhoff-Fraunhofer 衍射积分原理,以低能量线性偏振的 Ar^+ 激光入射厚度为 $75\text{ }\mu\text{m}$ 向列相液晶 5CB 薄膜,研究了向列相液晶 5CB 薄膜的对称和非对称横向非线性自相位调制,实验研究结果表明,以低能量激光入射,远场没有明显的衍射环出现;采用高能量($100\text{ W}/\text{cm}^2$)的纳秒激光($4\sim 5\text{ s}$)入射液晶薄膜,发现不

论激光是对称入射液晶薄膜还是非对称入射液晶薄膜,远场都会出现衍射效应,对称入射时,衍射场中的衍射环和光束的散度非常明显,同时还发现,在这样高能量激光对称入射情况下,衍射场中还出现了干涉环。2009 年,哈尔滨工业大学的任常恩和孙秀冬等人^[12]使用 5 mW 波长为 632.8 nm 的线偏振 He-Ne 激光,研究了垂直入射掺杂 C_{60} 的向列相液晶 5CB 膜的远场衍射,发现衍射场中出现了一系列衍射同心圆环。在上述实验研究的报道中,低功率激光入射向列相液晶 5CB 薄膜材料,不能产生远场衍射,只有使用高功率的激光才能产生远场衍射。但是,高功率激光入射时,在激发样品非线性衍射的同时也激发了样品的非线性干涉,导致在衍射环上叠加上了干涉环。在液晶 5CB 中掺杂 C_{60} ,能将入射激光的功率降低,但却不能低于 5 mW。本文使用超低功率的 He-Ne 激光,功率为 1.5 mW,激光波长为 632.8 nm,正入射向列相液晶 TEB30A 薄膜,研究弱磁场对其自衍射效应的影响。实验结果表明,在外磁场为 0 T(即不加磁场)的情况下,采用功率 1.5 mW 波长为 632.8 nm 激光正入射厚度为 $30\text{ }\mu\text{m}$ 向列相液晶 TEB30A 薄膜,在远场会产生明显衍射现象。不改变入射条件,样品、观察屏及激光三者的位置不变,给样品加上不同强度的弱偏置磁场(0.464 9, 0.506 2 和 0.518 5 T),发现了 3 种弱磁场都能使样品的远场衍射图样发生明显的变化,即衍射环数目增多,衍射环宽度变宽,衍射场的边界向外拓展。并且,在磁场强度为 0.506 2 T 情况下,衍射环上出现了近似相互平行的非线性干涉条纹。当磁场强度达到 0.518 5 T 时,干涉现象变得更加明显,干涉条纹更加趋于平行。当

有磁场存在时,激光散度变得明显。我们的实验研究表明,向列相液晶 TEB30A 材料可以将入射激光的功率大大降低,产生远场衍射的效果也远远优于已报道的相关研究。1.5 mW 功率的激光和这样的弱磁场也非常便捷操作,对周围环境不会产生附加影响。二者的费用远远低于高功率激光的费用。

2 实 验

采用自己搭建的实验测试装置进行测试,如图 1 所示。激光器到样品的距离为 144 cm,样品到屏的距离为 169 cm。实验是在室温下进行的。为了避免液晶样品中的非局域取向效应,我们采用厚为 30 μm 的液晶盒,将样品制成薄膜。液晶盒的玻璃窗涂有透明电极 ITO(indium tin oxide),经过表面取向剂 HTAB(hexadecyltrimethylammomum bromide)处理之后使液晶分子垂直玻璃窗表面排列。为了避免激光照射液晶样品而产生的热效应(即高强度激光照射液晶样品时会被照射部分由于温度的升高变成各向同性物质),使用低能量的 He-Ne 激光,激光器为输出功率为 1.5 mW,波长为 632.8 nm。给样品施加的外磁场的强度分别为 0.464 9,0.506 2 和 0.518 5 T。磁场的方向与激光入射的方向垂直。在正入射的条件下,我们分别测试了样品在未加磁场和加 3 种不同弱磁场情况下,激光透过液晶样品后的衍射图样。实验测试结果见图 2~图 5。

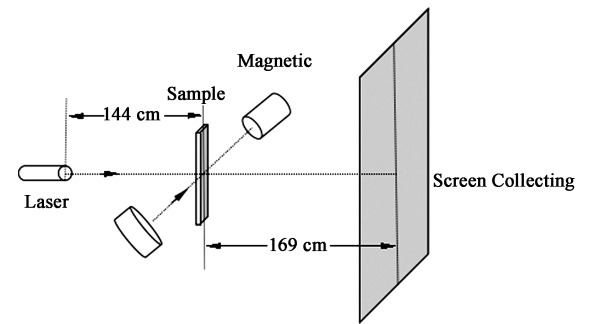


图 1 衍射实验测试装置
Fig. 1 Diffraction experiment setup

实验中发现,在光源与样品之间的距离确定(即样品入射面上光斑大小不变)的情况下,观察屏到样品的距离发生变化,会改变衍射场中衍射环的结构,为了减少影响样品衍射的参数,我们将

观察屏与样品之间的距离固定不变,即 $Z=169\text{ cm}$ 。在没有外磁场作用的情况下,向列相液晶 TEB30A 薄膜样品的衍射图样是一族细的密集的同心圆环(见图 2)。一些初步的理论计算结果显示,具有低弹性系数的液晶薄膜会产生较窄的衍射环,这样,图 2 的实验结果表明向列相液晶 TEB30A 具有较低的弹性系数。给液晶薄膜施加不同强度的外磁场(0.464 9,0.506 2 和 0.518 5 T),发现衍射图样会发生非常明显的变化(见图

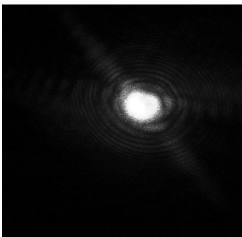


图 2 磁场强度为 0 T 的向列相液晶 TEB30A 薄膜的衍射图样
Fig. 2 Diffraction pattern of the nematic liquid crystal TEB30A film in the magnetic field intensity of 0 T

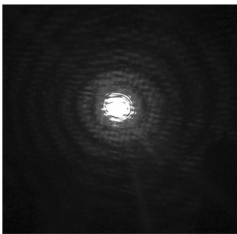


图 3 向列相液晶 TEB30A 薄膜处在磁场强度为 0.464 9 T 的衍射图样
Fig. 3 Diffraction pattern of the nematic liquid crystal TEB30A film in the magnetic field intensity of 0.464 9 T

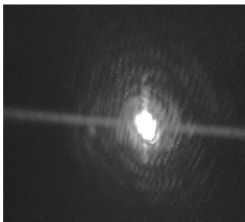


图 4 向列相液晶 TEB30A 薄膜处在磁场强度为 0.506 2 T 的衍射图样
Fig. 4 Diffraction pattern of the nematic liquid crystal TEB30A film in the magnetic field intensity of 0.506 2 T

3~图 5)。衍射环的数目增加,衍射环的宽度变宽,激光的散度变得明显,衍射场明显的向外拓展。随着外磁场强度的增加,衍射环上出现明显的直条纹。随外磁场强度的增加,直条纹趋于相互平行,衍射环出现不连续及清晰度下降。在外磁场为 0.518 5 T 的情况下,明显观察到衍射图

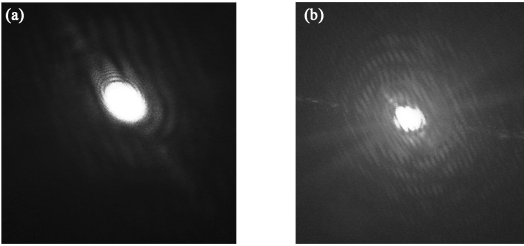


图 5 向列相液晶 TEB30A 薄膜处在磁场强度为 0.518 5 T 的衍射图样

Fig. 5 Diffraction pattern of the nematic liquid crystal TEB30A film in the magnetic field intensity of 0.518 5 T

样发生变化的过程,见图 5。图 5(a)是处于变化过程中衍射图样,图 5(b)是稳定后的衍射图样,这证明液晶分子在外磁场中转动,与我们之前的研究及相关文献报道的结果相吻合。

3 实验结果理论模拟分析

当高斯光束通过非线性薄膜样品时,可认为在光照射区域是一圆孔,光束通过这种圆孔时光波相位在其横截面上发生了变化,使得光束在远场的输出呈现围绕其中心的明暗相间的圆环,即空间自相位调制。考虑薄样品情况,忽略非线性吸收,利用 Kirchhoff-Fraunhofer 衍射积分原理,从理论上分析产生上述衍射现象的原因。

高斯光束通过液晶薄膜产生自衍射现象时,在距离样品为 Z 的观察屏上的衍射光强分布为^[13]:

$$I(r,Z)=\left(\frac{2\pi}{\lambda Z}\right)^2 I_0 \left| \int_0^\infty J_0\left(\frac{2\pi \rho r}{\lambda Z}\right) \rho d\rho \exp\left(-\frac{\rho^2}{\omega_0^2}\right) \exp[-i(\varphi_R(\rho)+\varphi_{NL}(\rho))] \right|^2, \tag{1}$$

式中: ρ 为入射面上径向坐标, r 为衍射面上径向坐标, ω_0 为介质入射面处光斑的半径, J_0 为第一类零阶 Bessel 函数, λ 为入射光波长, I_0 为入射光波, R 为入射光束波前的曲率半径, $\varphi_R(\rho)$ 和 $\varphi_{NL}(\rho)$ 分别为衍射相位和非线性相位,其表示式分别如下:

$$\varphi_R(\rho)=\frac{\pi \rho^2}{\lambda} \left(\frac{1}{Z} + \frac{1}{R} \right) = S \frac{\pi \rho^2}{\lambda}, \tag{2}$$

$$\varphi_{NL}(\rho)=\Delta \varphi_0 \exp\left(-\frac{2 \rho^2}{\omega_0^2}\right), \tag{3}$$

式中: $\Delta \varphi_0$ 是与光强有关的最大附加非线性相移。

利用式(1)~(3)对稳定的实验衍射数据进行理论模拟,模拟结果见图 6~图 9。

当单色高斯光束通过非线性样品时,会产生横向附加相移,结果使得光束的波阵面产生畸变,当这种畸变使得相邻波阵面间的相位差远大于 2π 时,光束输出就会在远场产生一系列明暗相间的同心圆环。因此,上述实验结果表明,波长为 632.8 nm 的低功率 He-Ne 激光光束通过向列相液晶 TEB30A 薄膜后,其光束相邻波阵面的相位差远大于 2π ,光束在薄膜样品出射面处产生了附

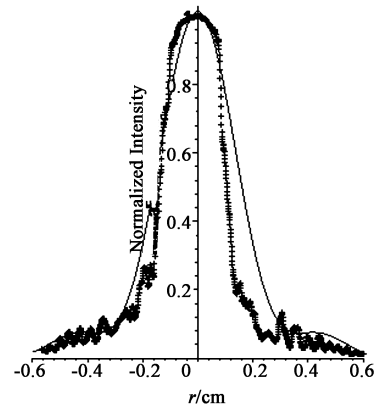


图 6 磁场强度为 0T 的实验测试结果(+)与理论模拟结果(—)的比较($\omega_0=0.5, S=0.148, \Delta \varphi_0=4\pi$)

Fig. 6 Comparison between experiment results(+) and thoretical simulation(—) in the magnetic field intensity of 0T

加的横向相移(非线性相移)。由于液晶分子本身具有弱磁性,当有外磁场存在时,其长轴方向会趋于外磁场方向转动,使得液晶分子长轴沿外磁场方向有序排列。又由于液晶分子受底板(液晶盒

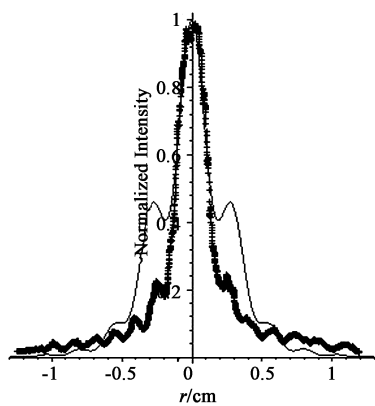


图 7 磁场强度为 0.464 9 T 的实验测试结果(+)与理论模拟结果(-)的比较($\omega_0=0.5, S=0.148, \Delta\varphi_0=8\pi$)

Fig. 7 Comparison between experiment results(+) and thoretetical simulation(-) in the magnetic field intensity of 0.464 9 T

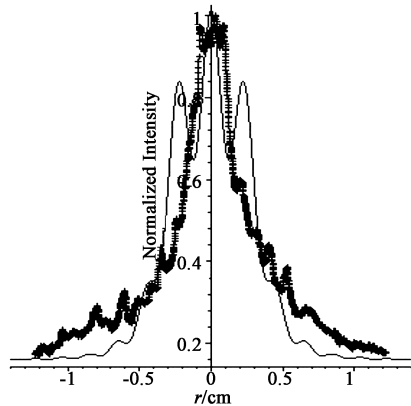


图 9 磁场强度为 0.518 5 T 的实验测试结果(+)与理论模拟结果(-)的比较($\omega_0=0.5, S=0.148, \Delta\varphi_0=20\pi$)

Fig. 9 Comparison between experiment results(+) and thoretetical simulation(-) in the magnetic field intensity of 0.518 5 T

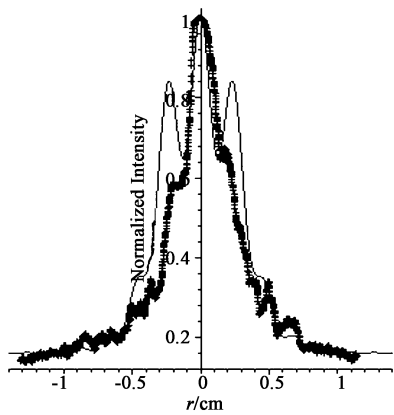


图 8 磁场强度为 0.506 2 T 的实验测试结果(+)与理论模拟结果(-)的比较($\omega_0=0.5, S=0.148, \Delta\varphi_0=16\pi$)

Fig. 8 Comparison between experiment results(+) and thoretetical simulation(-) in the magnetic field intensity of 0.506 2 T

度为 0.4649T 时,最大非线性相移为 8π ;磁场强度变为 0.506 2 T 时,最大非线性相移为 16π ;磁场强度变为 0.518 5 T 时,最大非线性相移为 20π 。随着外磁场强度的增加,光通过向列相液晶 TEB30A 薄膜后产生的最大非线性相移逐渐增大(即由 4π 增加到 20π),这表明液晶薄膜在外磁场的作用下其非线性特性也逐渐增大,从而产生了非线性干涉现象。

由于外磁场的存在,使得液晶分子的弹性增加,结果使得有磁场存在时衍射环的宽度大于没有磁场存在时衍射环的宽度,这一点与相关的理论计算结果相一致。

4 结 论

低功率 1.5 mW 的 He-Ne 激光通过厚度为 30 μm 向列相液晶 TEB30A 薄膜时,能在远场产生非线性衍射。在其他条件不变的情况下,给液晶薄膜施加不同的弱磁场(0.464 9, 0.506 2 和 0.518 5 T),能使衍射图样发生明显地改变(衍射环数目增加,衍射环宽度变宽,衍射场向外拓展)。理论模拟与实验结果的一致性表明,弱磁场能调制非线性向列相液晶薄膜远场自衍射,是因为施加于液晶薄膜上的弱磁场使原本具有弱磁性的向列相液晶 TEB30A 薄膜的非线性特性增大,结果使得低能量激光通过薄膜时,产生的横向非线性相移进一步加

透明窗)锚定力的作用,使得这种转动受到限制。因此,外磁场强度不同,液晶分子转动的角位移大小也不同,当光通过液晶样品时,在样品出射面处产生的附加横向相移的大小也不同。由衍射积分原理模拟的结果得知,在激光光源、样品及接收屏等三者之间的相对位置固定不变(即 $\omega_0=0.5, S=0.148$)时,非线性相移会随外磁场强度的增加而增大。没有磁场(即 0 T)情况下,非线性相移为 4π ;有磁场存在的情况下,磁场强

大,进而导致远场衍射图样发生明显的变化。远场衍射光强图样的变化也是透射光能量分布的改变,因此,可将弱磁场调控向列相液晶薄膜远场衍射这一技术应用于磁控光开关和光限幅等领域。

参 考 文 献:

- [1] OLYAEEFAR B, KHOSHSIMA H. Faster electro optical switching with a highly viscous nematic liquid crystal mixture[J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2014, 46(2): 357-363.
- [2] CHERNYSHUKS B. High-order elastic terms, boojums and general paradigm of the elastic interaction between colloidal particles in the nematicliquid crystals[J]. *The European Physical Journal E*, 2014, 37(1): 6.
- [3] MICHAEL J, MACNEIL L, SMYTHN F, *et al.* Exact and approximate solutions for optical solitary waves in nematic liquid crystals[J]. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 2014, 284: 1-15.
- [4] KHOO I C. Nonlinear optics, active plasmonics and metamaterials with liquid crystals[J]. *Progress in Quantum Electronics*, 2014, 38(2): 77-117.
- [5] NOROOZI N,GRECOV D. Numerical simulation of three-dimensional flow-induced microstructure in a simplified prosthetic hip joint with nematic liquid crystal lubricant[J].*RheologicaActa*, 2014, 53(5/6): 457-465.
- [6] ZOLOT'KOA S, KITAEVAV F, KROON, *et al.* The effect of an optical field on the nematic phase of the liquid crystal[J]. *JETPLetters*, 1980, 32(2): 158-162.
- [7] DURBINS D, ARAKELIANS F, SHENY R. Laser-induced diffraction rings from a nematic-liquid-crystal film[J]. *Optics Letters*, 1981, 6(9): 411-413.
- [8] SANTAMATO E, SHENY R. Field-curvature effect on the diffraction ring pattern of a laser beam dressed by spatial self-phase modulation in a nematic film[J]. *Optics Letters*, 1984, 9(12): 564-566.
- [9] BLOISI F, VICARI L, SIMONI F, *et al.* Self-phase modulation in nematic liquid-crystal films: detailed measurements and theoretical calculations[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 1988, 5(12): 2462-2466.
- [10] HSIUNG H, SHIL P, SHENY R. Transient laser-induced molecular reorientation and laser heating in a nematic liquid crystal [J]. *Physical Review A*, 1984, 30(3): 1453-1460.
- [11] KHOOI C, FINNG M, MICHAELR R, *et al.* Passive optical self-limiter using laser-induced axially asymmetric and symmetric transverse self-phase modulations in nematic liquid crystals[J]. *Optics Letters*, 1986, 11(4): 227-229.
- [12] 任常愚,孙秀冬,刘正君,等. C₆₀ 掺杂向列相液晶薄膜的激光诱导自衍射现象研究[J]. *光学学报*, 2009, 29(3): 772-777.
REN C Y, SUN X D, LIU Z J, *et al.* Investigation of self-diffraction effect in C60-doped nematic liquid crystals induced by Gaussian beam [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(3): 772-777. (in Chinese)

作者简介:刘桂香(1968—),女,内蒙古赤峰人,硕士,教授,从事液晶材料光学性质的研究。E-mail:gxliuemail@126.com