

光的偏振态对向列相液晶中光栅衍射的影响

任常愚, 金永君, 任敦亮, 姜洪喜

黑龙江科技学院数力系, 哈尔滨 150027

[摘要] 通过二波耦合实验研究了不同偏振态的两束写入光在向列相液晶中形成光栅的衍射现象。实验发现, 水平偏振态(P-P 偏振)照射时形成的光栅具有比竖直偏振态(S-S 偏振)照射时大得多的能量耦合, 且能量耦合方向完全相反。更重要的是, 当光栅形成之后改变其中一束光的偏振方向时, 透射光和衍射光的强度会随着其中一束光的偏振态的改变而变化。可见, 光的偏振态在决定 NLC 分子非线性取向时是一个非常重要的参数, 在以后的光电子功能器件应用中与偏振光相关的分子取向产生的非线性光学现象将会非常有用。

[关键词] 向列相液晶; 取向光折变效应; 二波耦合

[中图分类号] O753+.2

[文献标识码] A

[文章编号] 1000-7857(2007)15-0023-04

Influence of Light Polarization on Two-beam Coupling in Nematic Liquid Crystals

REN Changyu, JIN Yongjun, REN Dunliang, JIANG Hongxi

Department of Mathematics and Mechanics, Heilongjiang Institute of Science and Technology, Harbin 150027, China

Abstract: An experimental investigation on diffraction of two different polarized incident lights in C60-doped Nematic Liquid Crystal (NLC) homeotropically aligned is reported. The experiment shows that much greater energy transfer is created in grating recorded by horizontal polarization (P-P polarization) beams than that by vertical polarization (S-S polarization) ones, and the energy transfer direction is totally opposite. It is shown that when one incident beam polarization state is changed, the intensity of diffraction and transmitted beam will be changed accordingly after the grating is written. The polarization state is a very important parameter in the determination of nonlinear reorientation NLC. Nonlinear phenomena caused by molecular reorientation and their dependence on light polarization should be very useful in potential applications for optoelectronic functional elements.

Key Words: nematic liquid crystal; orientational photorefractive effect; two-beam coupling

CLC Number: O753+.2

Document Code: A

Article ID: 1000-7857(2007)15-0023-04

0 引言

人们对具有光折变(Photorefractive, PR)特性的非线性光学材料在光信号及数据处理等方面的应用研究已经有 30 多年^[1-3]的历史, 而近 10 年来, 向列相液晶(Nematic Liquid Crystal system, NLCs)以其大的光学各向异性、低驱动电压及可观的电光效应在动态全息、光信息处理、相位共轭及光开关等光子学应用领域受到

人们的广泛关注^[4-5]。向列相液晶系统的光折变效应机制与其他光折变材料稍有不同。1994 年, Rudenko 和 Khoo 等首次报道了向列相液晶的光折变效应^[6]。随后, Khoo 提出了 C₆₀ 和染料(dye-doped)掺杂的向列相液晶中的取向光折变效应(Orientational Photorefractive, OPR)的基本机制^[7], 即 NLCs 的空间电荷场是由于电荷载流子的浓度梯度引起的扩散和外加电场作用产生的

收稿日期: 2007-02-05

基金项目: 黑龙江省留学回国基金项目(LC01C11), 黑龙江省高等教育学会高等教育科学研究“十一五”规划课题(115C-168)

作者简介: 任常愚, 哈尔滨市松北区糖厂街 1 号黑龙江科技学院数力系, 教授, 研究方向为液晶及其光学全息存储、动态全息等;

E-mail: renchangyu@usth.edu.cn

漂移使载流子产生空间非均匀分布引起的。空间电荷场和外加电场对液晶分子的力矩作用使 NLCs 的指向矢重取向,产生了光致折射率改变,形成光栅。液晶产生非线性光学现象的根源在于液晶分子的取向。研究发现液晶分子的取向与许多因素有关,如液晶分子初始排列,实验系统的排布,以及是否有外加电场等^[8-9],光的偏振态也是一个重要的因素。

由于向列相液晶 (NLCs) 具有很大的光学各向异性,线偏振光在通过样品时其偏振状态必然要发生改变,也就必然影响液晶分子的取向。有些实验表明,光束的偏振态可作为有效的参数控制液晶分子的取向,使其在不同的偏振状态下产生不同非线性效应^[10-11]。本文通过二波耦合实验研究光在不同偏振态时对 NLCs 中分子取向形成光栅的衍射及能量耦合的影响,可以看到光的偏振态控制着液晶分子的取向,即光栅的形成,由此产生一些特有的非线性效应。

1 实验

实验时所用的材料为向列相液晶 4-cyano-4'-n-pentylbiphenyl (5CB) 中掺杂少量的 fullerene (C_{60} : ~0.05 wt%),二者均为美国 Sigma-Aldrich 公司的产品,样品做成厚度为 20 μm 的液晶盒。在液晶的清亮点通过毛细作用使液晶流进盒中,液晶盒极板内侧的透明电极经过取向处理 (HTAB) 后使液晶分子在液晶盒内垂直排列 (Homeotropically aligned), C_{60} 作为光敏剂能够有效地产生光电荷。实验所用的光源为波长 632.8 nm 线偏振的 He-Ne 激光,通过半波片 (HWP) 可以改变光源的偏振方向。

图 1 是二波耦合实验的示意图,并规定透过液晶盒的光束偏向法线方向的衍射为正方向衍射,分别标为 +1 级, +2 级, ...; 偏离法线方向的衍射为负方向衍射,分别标为 -1 级, -2 级, ...。利用水平和竖直偏振方向的两束 He-Ne 激光,光功率为 4 mW,光斑直径为 2 mm。液晶

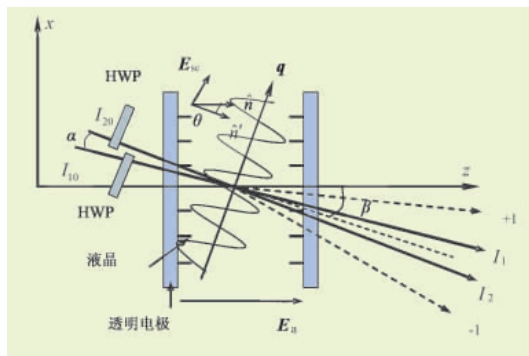


图 1 二波耦合实验示意图

注: HWP-半波片; E_{dc} -直流电场

Fig. 1 Optical scheme used for two-beam coupling

Notes: HWP: half-wave plate; E_{dc} : applied electric field

盒的法线与两束入射光夹角平分线的角度为 45° , 这样可使外加电场在光栅波矢方向有一个分量, 从而达到在波矢方向施加电场的目的。耦合角控制在 $\alpha=1.5^\circ$, 相应地, 光栅常数为 $\Lambda=\lambda/[2\sin(\theta/2)]=24\ \mu\text{m}$, 外加可调直流电压 (0~4 V) 正方向。

2 结果与讨论

2.1 光栅的形成

让两束相干线偏振光束 I_{10} 和 I_{20} 在液晶盒中相遇, 则在液晶层内形成周期性的干涉光强分布

$$I(r)=I_0(1+m\cos q\cdot r) \quad (1)$$

式中 $I_0=I_{10}+I_{20}$ 为总光强, $m=2\sqrt{I_{10}I_{20}}/I_0$ 是光强调制度, $|q|=2\pi/\Lambda$ 为光栅波矢, Λ 为光栅常数。则液晶层中形成的折射率光栅为^[7]

$$\Delta n=\Delta n_e\cos(qx+\phi_{sc})E_{dc}E_{sc} \quad (2)$$

其中, $\Delta n_e=(n_{\parallel}-n_{\perp})\frac{n_{\parallel}}{n_{\perp}}(\sin 2\beta)\theta$, E_{sc} 为空间电荷场, ϕ_{sc} 为

折射率光栅相对于强度干涉条纹的空间相移, θ 为液晶分子的取向角, $n_{\parallel}$ 和 $n_{\perp}$ 分别为光电场平行和垂直指向矢时的折射率。

2.2 水平偏振光和垂直偏振光形成光栅的衍射及指数增益系数

图 2 是两束 (I_{10}, I_{20}) 水平偏振光 (P-polarization) 和竖直偏振光 (S-polarization) 照射液晶盒时二波耦合现象照片, (两束) 水平偏振光照射液晶盒时间为 30 s 时, 透过光的多级衍射照片, 从图片中可看到明显的非对称高阶衍射, 说明在液晶盒中形成的光栅为 Raman-Nath 型非局域光栅。当使用竖直偏振光时也可观察到类似的现象, 只是光能量转移的方向不同。另外, 不同偏振光在响应时间上没有差别。

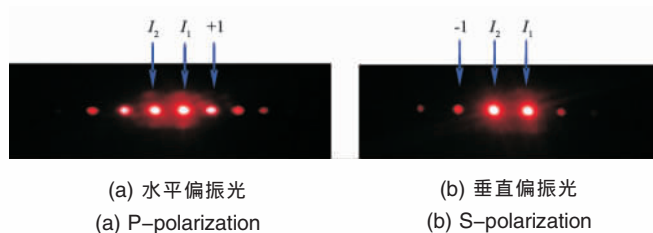


图 2 透射光束 (I_1, I_2) 和高级衍射光束 (± 1)

Fig. 2 Photographs of the transmitted input beams (I_1, I_2) and their high-order diffractions (± 1)

从衍射光强分布图像 (见图 3) 也可以看到多级衍射是非对称的, 且能量转移方向不同 (外加电场方向不变时)。说明不同偏振光在液晶盒中形成了不同的折射率光栅, 即 Δn 不同。

如果外加电场的方向取反方向, 即 $E_{dc} \rightarrow -E_{dc}$, 这等于将光栅函数式 (2) 的位相改变 π , 使得光强耦合系

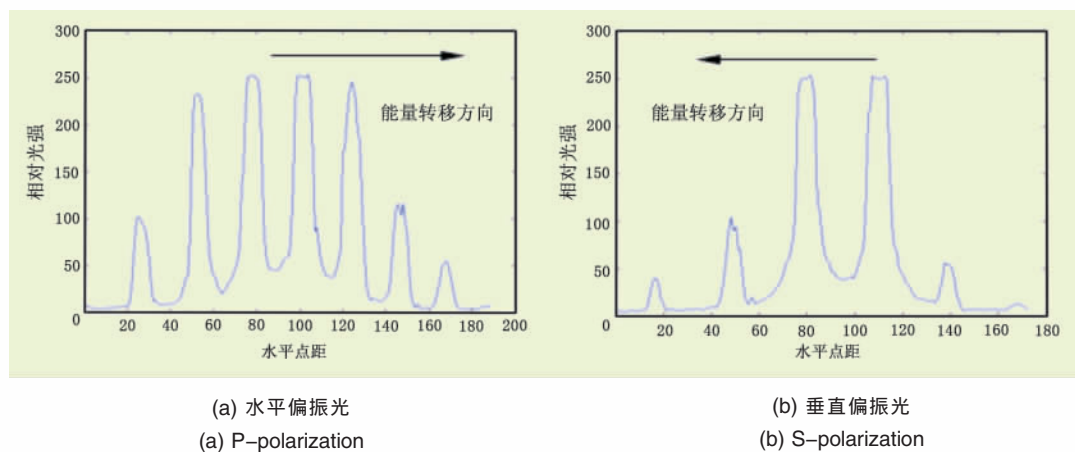


图 3 水平偏振和垂直偏振光衍射强度分布及能量转移方向

Fig. 3 Distribution of diffraction beam intensity and energy change for P-polarization and S-polarization pump light

数亦反号,将使二波耦合的能量转移方向发生改变。

实验中,为了描述耦合强度,通过测量有电场存在和没有电场时透过样品的光强比,可定义样品的二波耦合净指数增益系数^[4]如下

$$\Gamma = \frac{1}{L} \left[\ln \frac{I_{12}}{I_1} - \ln \left(2 - \frac{I_{12}}{I_1} \right) \right] - \gamma \quad (3)$$

这里, I_1 为光束 2 存在没有外加电场时光束 1 的透射强度, I_{12} 为光束 2 存在且有外加电场时光束 1 的透射强度, $L = d \cos \beta$ 为光栅厚度, d 为液晶层的厚度, γ 为总的光损失,包括散射、反射和吸收的损失, $\gamma < 30 \text{ cm}^{-1}$ 。在电压为 3.2 V 左右、光功率 4 mW 时得到的水平方向偏振

光净增益系数约为 480 cm^{-1} , 垂直偏振光的净增益几乎为零。图 4 也可以看出水平偏振光的二波耦合实验中有很大的能量耦合,而在垂直偏振光的情况下却观察不到能量耦合,其原因是:光场作用在液晶分子的转动力矩为^[12] $M^{\text{opt}} \propto (\mathbf{n} \times \mathbf{E})(\mathbf{n} \cdot \mathbf{E})$ 时,只有水平偏振光场才能产生较大的力矩,使液晶分子转向,形成折射率光栅。在液晶取向光折变效应中,空间电荷场产生于空间电荷的不均匀分布,由泊松方程 $\nabla \cdot \mathbf{E}_{\text{sc}} = \rho/\epsilon$ 可知液晶折射率相位光栅相对于空间干涉条纹有 $\pi/2$ 的空间相移,即相位光栅是一种非局域光栅,这就是两光束之间产生较大能量转移的原因。通过能量耦合率曲线可以知道形成的折射率光栅的质量及能量耦合的效果。

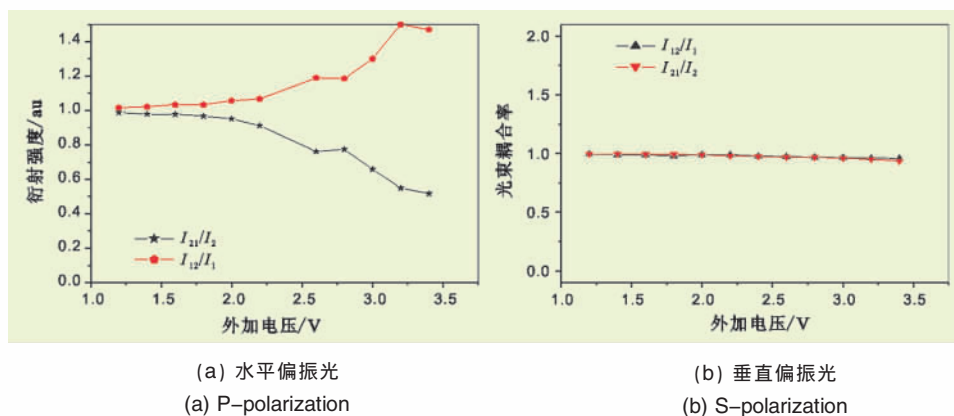


图 4 水平偏振和垂直偏振光束耦合率与电压的关系

Fig. 4 Beam-coupling ratio versus applied voltage for both the P-polarization and S-polarization

2.3 光的偏振方向改变时光栅的能量转移

实验发现,当 P-P 偏振或 S-S 偏振的入射光照射形成光栅之后,改变其中一束光的偏振方向即 P-P 偏振变成 P-S(S-P)偏振或 S-S 偏振变成 S-P(P-S)偏振时,透射光和衍射光的强度会随着其中一束光的偏振态

的改变而变化。

图 5 显示两束水平偏振光(P-P 偏振)在液晶盒中形成光栅之后,当改变其中一束光的偏振态(I_{20} :P→S)时可以看到+1 和-1 级衍射光都同时减弱,与 I_2 同侧的衍射光-1 会迅速减小,几乎观察不到;与 I_1 同侧的衍射

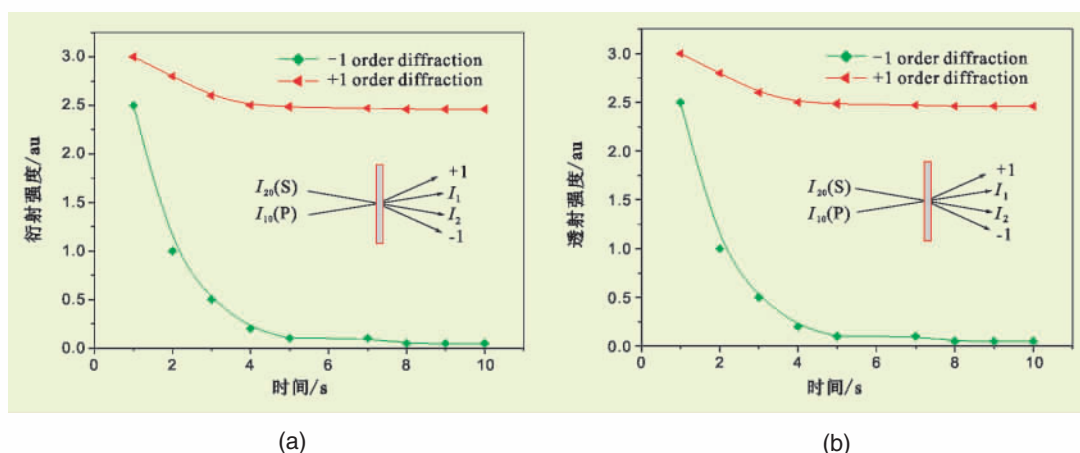


图5 衍射光和透射光的强度变化与其中一束光的偏振态改变时的关系
Fig. 5 Dependence of alteration of diffraction/transmitted beam on the change of one incident beam's polarization state

光+1 则减弱到较小的值,但并不消失。而两束透射光的强度则是 I_1 (P 偏振)增强、 I_2 (S 偏振)减弱。

当两束竖直偏振光(S-S 偏振)在液晶盒中形成光栅,改变其中一束光的偏振态(I_{20} :S $\rightarrow$ P)时+1 级衍射光增强到一个稳定值,-1 级衍射光则迅速减弱,几乎观察不到。而两束透射光的强度则是 I_1 (S 偏振)减弱、 I_2 (P 偏振)增强。

P-P 偏振或 S-S 偏振的入射光照射液晶盒之后形成光栅的能量转移还表现出与外加直流电压有一定的依赖关系。

3 结论

光的偏振方向对向列相液晶取向光折变效应具有重要影响,从本文的实验研究及有关的文献可以看到,光的偏振态在决定 NLC 分子非线性取向时是一个非常重要的参数,在以后的光电子功能器件应用中与偏振光相关的分子取向产生的非线性光学现象将会非常有用。其中,NLC 在实际应用中最重要并且吸引人的方面就是大双折射性以及由低光强在很宽的光谱范围内(从紫外到远红外)产生的取向非线性。由于其独特的非线性,NLC 在光学通信网络中具有很多潜在的应用领域。确定并控制光的偏振态对于各种传感器件的功能和数据处理系统来说非常重要。向列相液晶在偏振调制器、偏振态转换器件中也会起到重要作用。

参考文献 (References)

- [1] GÜNTHER P, HUIGNARD J P. Photorefractive materials and their applications I & II [M]. Berlin: Springer Verlag, 1988: 1-20.
- [2] FEINBERG J. Photorefractive nonlinear optics [J]. Physics Today, 1988, 41: 46-52.
- [3] DUCHARME S, SCOTT J C, TWIEG R J, *et al.* Observation of the photorefractive effect in a polymer [J]. Physical Review Letters, 1991, 66(14): 1846-1849.
- [4] WIEDERRICHT G P. Photorefractive liquid crystal [J]. Annual Review of Materials Research, 2001, 31: 139-169.
- [5] KHOO I C. Liquid crystal: Physical properties and nonlinear optical phenomena [M]. New York: Wiley Interscience, 1994.
- [6] KHOO I C, LI H, LIANG Y. Observation of orientational photorefractive effects in nematic liquid crystals [J]. Optics Letters, 1994, 19: 1723-1725.
- [7] KHOO I C. Orientational photorefractive effects in nematic liquid crystal films[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1996, 32(3): 525-534.
- [8] ZHANG J, OSTROVERKHOV V, SINGER K D. Electrically controlled surface diffraction gratings in nematic liquid crystals[J]. Optics Letters, 2000, 25(6): 414-416.
- [9] ZHANG G, MONTEMEZZANI G, GUNTER P. Orientational photorefractive effect in nematic liquid crystal with externally applied fields [J]. Journal of Applied Physics, 2000, 88(4): 1709-1717.
- [10] BRZDAKIEWICZ K A, KARPIERZ M A. Influence of light polarization on reorientational nonlinearity in nematic liquid crystals [J]. Acta Physica Polonica A, 2003, 103: 195-205.
- [11] LUCCHETTI L, DIFABRIZIO M, FRANCESCANGELI O, *et al.* Light-induced adsorption and desorption in dynamic and stable grating formation in methyl-red doped liquid crystals [J]. Journal of Nonlinear Optical Physics and Materials, 2002, 11(1): 13-23.
- [12] JANOSSY I. Molecular interpretation of the absorption-induced optical reorientation of nematic liquid crystals [J]. Physical Review E, 1994, 49(4): 2957-2963.

(责任编辑 齐志红)