

偏振敏感材料中具有圆各向异性的偏振全息光栅

李海燕 董毓芳 徐则达

(北京航空航天大学理学院物理系, 北京 100083)

摘要 在向列相液晶中掺杂质量分数约 0.2% 的偶氮侧链型聚合物制成偏振敏感材料, 使用正交圆偏振光记录了具有圆各向异性的一维偏振全息光栅, 用线偏振光探测偏振全息光栅, 得到正、负一级衍射光也为线偏振光, 且偏振态与探测光和零级偏振态相互正交, 可以运用琼斯矩阵理论加以解释。偏振全息光栅可由外加电场控制衍射级的变化, 即在外加电场作用下, 正、负一级衍射产生了 90° 的相位差。在频率 6.05 Hz、电压 2.2 V 的外场作用下, 衍射级的极值振荡变化。

关键词 光栅; 偏振敏感材料; 偏振全息光栅; 偏振态; 琼斯矩阵

中图分类号 O753.2 **文献标识码** A

Polarization Holographic Grating with Circular Anisotropy Recorded in Polarization-Sensitive Materials

Li Haiyan Dong Yufang Xu Zeda

(Department of Physics, Beijing University of Aeronautics & Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract The polarization-sensitive material is fabricated with nematic liquid crystal doped with 0.2% (mass fraction) of azobenzene side-chain liquid-crystalline polymer, in which polarization holographic grating with circular anisotropy was recorded by two orthogonal circular-polarization light beams. It found that when the probe beam is linearly polarized, the ± 1 order diffraction beams are also linearly polarized with polarization direction perpendicular to that of the probe light and the zero-order diffraction light. The experimental results are in good agreement with the theoretical expectation based on Jones matrix. The diffraction orders can be controlled by the applied electric field, and there is 90° phase difference between the ± 1 orders diffraction beams. When the frequency is 6.05 Hz and the applied voltage is 2.2 V, the extreme value of diffraction orders oscillates.

Key words grating; polarization-sensitive material; polarization holographic grating; polarization; Jones matrix

1 引 言

全光设备将会在未来的高速信息存储方面起重要的作用, 例如全息数据处理、光图像转换、模式识别、光限幅以及光互联等方面^[1~3]。对于由光的传播方向和偏振状态控制的高性能光学设备, 没有表面浮雕结构的纯偏振全息光栅是重要的组成部分之一。在偏振敏感材料中使用正交线偏振光或者正交圆偏振光能够记录这种纯偏振全息光栅, 在这种记录光栅方式中, 两束偏振光的合成光场的偏振态是空间调制的, 光强不变, 偏振态的空间调制在媒质中诱导了周

期性调制的各向异性。L. Nikolova 等^[4,5]报道了用正交圆偏振光在偏振敏感材料中记录偏振全息光栅, 用线偏振光探测, 得到正、负一级衍射的偏振态是圆偏振。这种偏振特性可用光诱导各向异性的琼斯矩阵理论解释。目前, Hiroshi Ono 等^[5~8]报道了在聚合物薄膜记录的具有圆各向异性的偏振全息光栅, 偏振全息光栅在 He-Ne 激光探测下呈现出不同于传统偏振光栅的特殊的实验现象。

本文在偏振敏感材料中使用正交圆偏振光记录偏振全息光栅, 这种光栅属于纯偏振光栅且具有圆各

收稿日期: 2007-06-07; 收到修改稿日期: 2007-11-14

基金项目: 北京航空航天大学理学院科研基金(0514)资助课题。

作者简介: 李海燕(1981-), 女, 吉林人, 硕士研究生, 主要从事液晶光学方面的研究。E-mail: lihaiyan8181@163.com

导师简介: 徐则达(1963-), 男, 内蒙古人, 副教授, 主要从事非线性光学方面的研究。E-mail: xuzd@buaa.edu.cn

向异性,用线偏振光探测这种光栅。我们已经报道了利用探测光的偏振态控制衍射级的变化^[9],而本文记录的光栅可以通过外加电场控制衍射级的变化。

2 实 验

实验采用的偏振敏感材料是向列相液晶(4-正戊基-4'-氰基联苯)中掺杂质量分数约为 0.2%、具有圆二色性的偶氮侧链型聚合物^[10]。样品盒由两片普通的氧化锡铟导电玻璃基板组成,将聚酰亚胺均匀涂在玻璃基板上,固化烘干后平行摩擦取向,再注入聚合物掺杂液晶形成样品盒(盒厚约为 7 μm)。

记录偏振光栅的实验光路图如图 1 所示,采用 Ar^+ (514.5 nm)激光器作为写入光光源,经全反镜、分束镜和格兰-泰勒棱镜得到两束正交线偏振光,调节四分之一波片找到波片的光轴方向,再将两个四分之一波片分别沿光轴方向顺时针和逆时针旋转 45° ,使两束线偏振光变成相互正交的圆偏振光,即一束为左旋圆偏振光,另一束为右旋圆偏振光。用量角器测得两束光之间的夹角为 5° ,用光强计测得两束写入光的光强值均为 52 mW/cm^2 。调测好光路后,照射样品约 2 min 记录光栅。

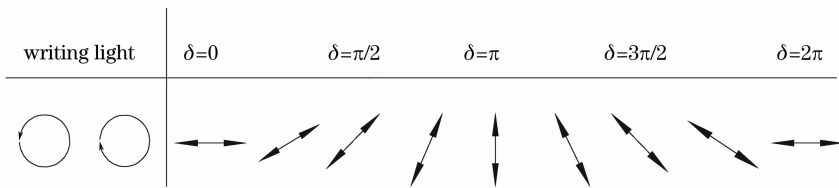


图 2 正交圆偏振光记录光场的偏振态周期调制示意图

Fig. 2 Periodic modulation of light polarization in recording with two orthogonal circular polarization waves

光栅形成的物理机制是样品中聚合物主链吸附在液晶盒的取向层上,光敏分子位于侧链且与液晶分子存在范德瓦尔斯相互作用。由于光敏分子的取向总是垂直于外光场的矢量方向,所以光敏分子在外加光场,即正交圆偏振光的合光场的作用下重新排列周期取向。光敏分子的周期取向诱导液晶分子周期取向,从而形成光栅。由于记录光栅的介质处于夹层中,即具备典型的夹层结构,所以不会产生起伏光栅,记录的光栅为纯偏振光栅^[6]。

3 实验结果与讨论

使用偏光显微镜拍得正交圆偏振光在聚合物掺杂液晶中记录的偏振光栅照片如图 3 所示,光栅周期约为 7 μm 。

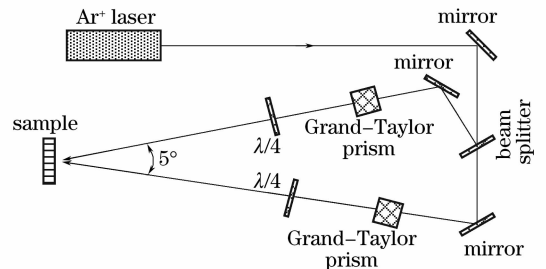


图 1 偏振记录光栅实验光路图

Fig. 1 Experimental setup for polarization recording gratings

记录光栅的写入光分别为左旋圆偏振光和右旋圆偏振光,两束偏振光在样品表面叠加后的合场强为^[11]

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_2 = \frac{1}{2}E_0 \begin{bmatrix} \cos \delta \\ \sin \delta \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中 δ 为两束写入光的相位差, E_0 为写入光的光强, E_1 为左旋圆偏振光的光强, E_2 为右旋圆偏振光的光强。由(1)式可以看出正交圆偏振光叠加后的光场为线偏振光,振幅大小与 δ 无关,只是振动方向随 δ 的改变而改变,其变化情况如图 2 所示,本文就是用这种空间周期调制的光场记录光栅的。

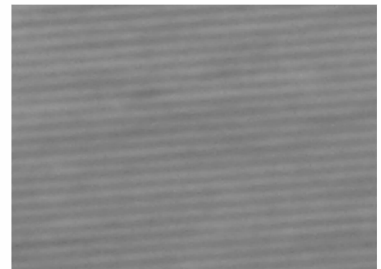


图 3 偏振光栅的照片

Fig. 3 Photograph of polarization grating

3.1 偏振光栅的衍射特性

衍射实验光路图如图 4 所示, He-Ne 激光器作为探测光源,通过格兰-泰勒棱镜,光的偏振方向为水平方向,加二分之一波片可以调整探测光的偏振方向。在衍射光路径上放置格兰-泰勒棱镜分析衍

射光的偏振态。每隔 10° 旋转一次格兰-泰勒棱镜就记录一次光强值,将测得的数据绘制在极坐标下,如图 5 所示。由图 5 可以看到,衍射级的偏振方向与探测光、零级的偏振方向相互正交。

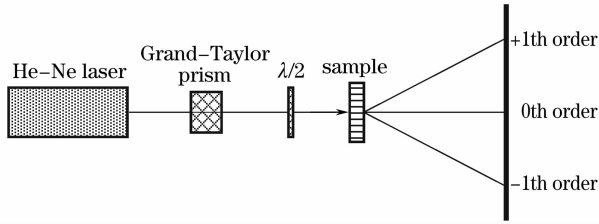


图 4 衍射实验光路图

Fig. 4 Sketch of diffraction experimental setup

参照各向异性的测量方法^[4],测得记录全息光栅的介质中诱导了圆各向异性,结合文献^[5,6]的讨论分析,透射矩阵可以近似表示成

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} 1 & \sin(\Delta\varphi \sin \delta) \\ -\sin(\Delta\varphi \sin \delta) & 1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中 $\Delta\varphi$ 为光诱导圆各向异性。考虑探测光入射到样品盒表面及透射样品盒发生的坐标旋转角度为 θ ,

$$\mathbf{T}_{\pm 1} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & \Delta\varphi \sin \delta \\ -\Delta\varphi \sin \delta & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} = \Delta\varphi \begin{bmatrix} 0 & \sin \delta \\ -\sin \delta & 0 \end{bmatrix} = \frac{\Delta\varphi}{2i} \exp(i\delta) \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix} + \frac{\Delta\varphi}{2i} \exp(-i\delta) \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

衍射实验中使用的探测光为线偏振光,即 $\mathbf{E} = \begin{bmatrix} \cos \alpha \\ \sin \alpha \end{bmatrix}$,其中 α 为探测光的偏振方向与光栅矢量的夹角。

则正、负一级衍射场强为

$$E_{\pm 1} = \frac{\Delta\varphi}{2i} \exp(i\delta) \begin{bmatrix} \sin \alpha \\ -\cos \alpha \end{bmatrix} - \frac{\Delta\varphi}{2i} \exp(-i\delta) \begin{bmatrix} \sin \alpha \\ -\cos \alpha \end{bmatrix}, \quad (4)$$

由(4)式可以看出正、负一级衍射光为线偏振光,且偏振方向与探测光的偏振方向相互正交。这一理论计算结果与实验观察现象相一致。

3.2 衍射级随外加电场的变化

在衍射实验光路图中,样品盒两端加正弦交流电,光电探测器连接示波器与计算机记录正、负一级衍射光强度。图 6 为频率为 1 kHz 时,正、负一级衍射光强随外加电压的变化曲线。

正、负一级衍射效率^[12]可由 $\eta_{\pm 1} = \sin^2 \left(\frac{\pi \Delta n}{\lambda_0} d \right)$ 表示,根据液晶的电控双折射效应^[13,14],则正、负一级衍射效率与外加电场的关系为

$$\eta_{\pm 1} = \sin^2 \left[\frac{4\pi}{\lambda_0} \frac{\Delta V}{V_{th}} (n_{//} - n_{\perp}) d \right]. \quad (5)$$

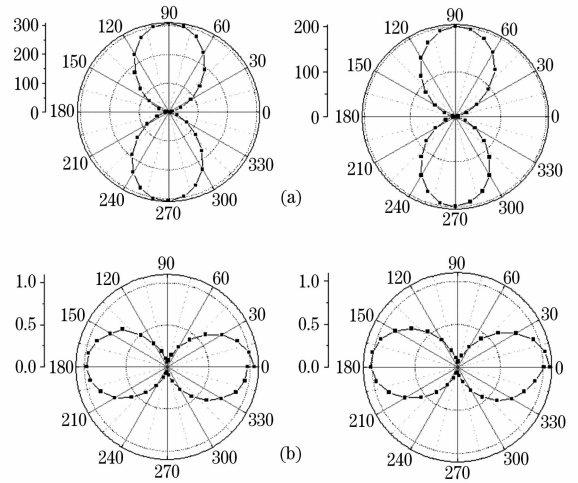


图 5 探测光和衍射光的偏振态。(a) 入射光和零级光, (b) 正、负一级衍射光

Fig. 5 Polarization of probe beam and diffracted beams. (a) Probe beam and zero-order beam, (b) ± 1 th order diffracted beam

θ 为光轴方向相对于原坐标的旋转角度,取 $\theta = 45^\circ$,则正、负一级衍射光的透射矩阵可以表示成

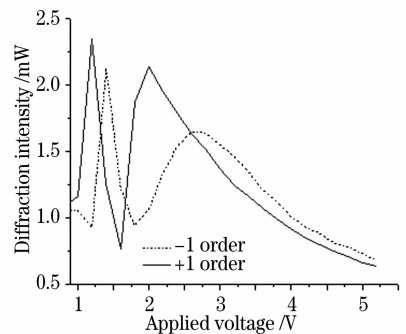


图 6 当频率为 1 kHz 时正、负一级衍射光强随外加电压变化
Fig. 6 Dependence of the diffraction intensity of ± 1 th orders diffracted beams on applied voltage

式中 ΔV 为电压的改变量, V_{th} 为阈值电压, $n_{//}$ 、 n_{\perp} 分别为 o 光和 e 光的折射率。(5) 式表明正、负一级的衍

射效率随着 Δn 的变化而周期变化,而 Δn 又随外加电压周期性变化,所以正、负一级衍射效率随外加电压周期性变化。

由图 6 可以看出,正、负一级衍射光强值随外加电压值改变而变化,当外加电压值为 1.2 V 和 2 V 时,正一级光强出现最大值,而负一级光强为最小值;当外加电压值为 1.4 V 时,负一级光强出现最大值,而正一级光强为最小值;当外加电压值大于 2.6 V 时,正、负一级衍射光强不再随外加电压的改变而变化。正一级的波峰值刚好与负一级的波谷值对应,说明在不同电压下正、负一级衍射光强发生了能量交换,通过控制外加电压进而可以控制衍射级的有无。

在实验过程中还发现,控制衍射级变化的外加电压值对于不同频率值是不相等的,而且在低频条件下,正、负一级衍射发生自振荡现象。

图 7 是在低频 6.05 Hz、电压 2.2 V 条件下用光电探测器连接示波器记录的正、负一级衍射光强周期变化图,可以看出在该外加电场作用下,正、负一级衍射是振荡变化的,且正一级衍射的极大值对应负一级衍射的极小值,正一级衍射极小值对应负一级衍射的极大值,这说明在外加电场的作用下,正、负一级衍射产生了 90° 的相位差。实验现象表明该外加电场可以自动控制衍射级的变化。

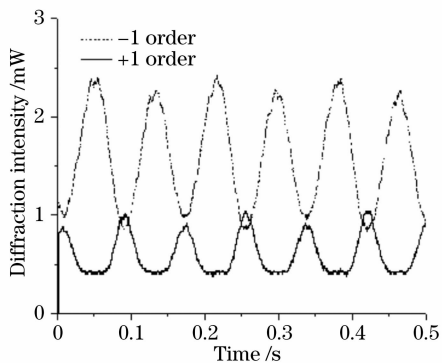


图 7 在频率为 6.05 Hz、电压为 2.2 V 时衍射光强随时间的变化关系

Fig. 7 Dependence of diffraction intensity on time when frequency is 6.05 Hz and applied voltage is 2.2 V

4 结 论

介绍了在聚合物掺杂液晶中使用正交圆偏振光记录的具有圆各向异性的一维偏振全息光栅,用线偏振光探测,得到正、负一级衍射级也是线偏振的,且偏振态与探测光和零级偏振态相互正交,这一现象可以运用琼斯矩阵理论加以解释。记录的光栅可以通过外加电压来控制衍射级的变化。在同一频率不同电

压的电场作用下,正、负一级衍射强度极值出现更替现象,说明了该偏振光栅在外加电场作用下衍射级之间发生了能量交换。在低频特定电压下,衍射级的极值变化成自动振荡。

参 考 文 献

- 1 Ren Zhiwei, Yao Baoli, Menke Neimule *et al.*. Experimental study on angle multiplexing and polarization multiplexing holographic recording with bacteriorhodopsin film[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(6): 822~826
任志伟,姚保利,门克内木乐等. 利用菌紫质薄膜进行角度复用和偏振复用全息存储实验研究[J]. *光学学报*, 2006, **26**(6): 822~826
- 2 Xu Min, Zhu Jianhua, Chen Li *et al.*. Spatial resolution of polyvinyl alcohol/acrylamide based photopolymer holographic recording material [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(4): 616~620
徐敏,朱建华,陈力等. 红敏聚乙烯醇/丙烯酰胺体系光致聚合物全息记录材料的空间分辨力增强研究[J]. *光学学报*, 2007, **27**(4): 616~620
- 3 Zheng Jihong, Gu Lingjuan, Zhuang Songlin *et al.*. Design and simulation of dynamic gain equalizer based on holographic polymer dispersed liquid crystal volume grating[J]. *Chin. J. Lasers*, 2006, **33**(8): 1087~1091
郑继红,顾玲娟,庄松林等. 基于全息聚合物液晶光栅的动态增益均衡器的设计与模拟[J]. *中国激光*, 2006, **33**(8): 1087~1091
- 4 L. Nikolova, T. Todorov, M. Ivanov *et al.*. Photoinduced circular anisotropy in side-chain azobenzene polyesters[J]. *Opt. Mater.*, 1997, **8**(4): 255~258
- 5 Hiroshi Ono, Fumihiko Takahashi, Akira Emoto *et al.*. Polarization holograms in azo dye-doped polymer dissolved liquid crystal composites[J]. *J. Appl. Phys.*, 2005, **97**(5): 053508-1~053508-8
- 6 L. Nikolova, T. Todorov, M. Ivanov *et al.*. Polarization holographic gratings in side-chain azobenzene polyesters with linear and circular photoanisotropy [J]. *Appl. Opt.*, 1996, **35**(20): 3835~3840
- 7 L. Nikolova, T. Todorov. Diffraction efficiency and selectivity of polarization holographic recording[J]. *Opt. Acta*, 1984, **31**(5): 579~588
- 8 Hiroshi Ono, Akira Emoto, Fumihiko Takahashi *et al.*. Highly stable polarization gratings in photocrosslinkable polymer liquid crystals[J]. *J. Appl. Phys.*, 2003, **94**(3): 1298~1303
- 9 Li Haiyan, Dong Yufang. Polarization-controlled switching between diffraction orders in liquid crystals doped with polymer[J]. *Chin. J. Liquid Crystals and Displays*, 2007, **22**(4): 473~476
李海燕,董毓芳. 聚合物掺杂液晶探测光偏振态控制衍射级变化[J]. *液晶与显示*, 2007, **22**(4): 473~476
- 10 Zeda Xu, Yong Zhang, Xinghe Fan *et al.*. Optical phase conjugation response of photoinduced polymer films containing azobenzene moieties with chiral group[J]. *Chin. J. Polymer Science*, 2002, **20**(2): 99~104
- 11 Yu Meiwen, Zhang Cunlin. Transmission matrix of polarization holograms in the photoinduced anisotropy recording material[J]. *Acta Physica Sinica*, 1992, **41**(5): 759~763
于美文,张存林. 光致各向异性记录介质偏振全息图的投射矩阵[J]. *物理学报*, 1992, **41**(5): 759~763
- 12 L. M. Blinov, G. Cipparrone, A. Mazzulla *et al.*. Electric field controlled polarization grating based on a hybrid structure 'photosensitive polymer-liquid crystal'[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2005, **87**(6): 061105~061107
- 13 Huang Ziqiang. *Principle of Liquid Crystal Display* [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2006. 120~123
黄子强. *液晶显示原理* [M]. 北京: 国防工业出版社, 2006. 120~123
- 14 Wang Wei, Li Guohua, Xue Dong. A study of voltage-dependent electric-control birefringence of liquid crystal[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(7): 970~972
王伟,李国华,薛冬. 液晶电控双折射率与电压关系的研究[J]. *光学学报*, 2004, **24**(7): 970~972