

文章编号:1007-2780(2011)04-0443-05

向列相液晶中高阶衍射图像的特性

兰 民¹,任常愚^{2*}

(1. 长春工业大学 基础科学学院, 吉林 长春 130012;

2. 黑龙江科技学院 理学院, 黑龙江 哈尔滨 150027)

摘 要: 研究了垂直排列 C₆₀ 掺杂的向列相液晶(5CB)记录光折变光栅衍射像的特性。利用二波耦合实验,以较小入射角的信号光束与参考光束在样品中干涉并形成光折变光栅。在远离样品的观察屏上可观察到高阶衍射像。对衍射像进行分析发现,信号光一侧的二阶衍射像被放大,而在参考光一侧的负一阶衍射虽没放大,但产生了 180° 旋转,理论分析与实验观察结果非常吻合。

关 键 词: 向列相液晶; 光折变效应; 光栅; 衍射图像

中图分类号: O753⁺. 2 文献标识码: A DOI: 10. 3788/YJYXS20112604. 0443

Characteristics of Higher-Order Diffraction Image Based on Photorefractive Grating in Nematic Liquid Crystals

LAN Min¹, REN Chang-yu^{2*}

(1. School of Basic Science, Changchun University of Technology, Changchun, 130012, China;

2. School of Science, Heilongjiang Institute of Science and Technology, Harbin 150027, China)

Abstract: The characteristics of the higher-order diffraction images of a photorefractive grating recorded in cells of homeotropically aligned nematic liquid crystal (5CB) doped with sensitizer C₆₀ were studied. In two-beam coupling (TBC) experiments, one incident signal beam is interfered with a mutually coherent reference beam within the sample at a small incident angle and the photorefractive gratings formed. The higher-order diffraction images were observed on the screen behind the sample. It was shown that the image corresponding to the second order diffraction image which is located at the side of the signal beam is magnified, and the image corresponding to the negative first order which is located at the side of the reference beam is 180° rotated. The theoretical analyses are in good agreement with the experimental results.

Key words: nematic liquid crystal; photorefractive effect; grating; diffraction image

1 引 言

1994 年, Rudenko 和 Khoo 等人首次报道了向列相液晶(Nematic liquid crystals, NLCs)的取

向光折变效应^[1-5]。由于此效应可使两束相干光在向列相液晶写入动态全息光栅,因此在较短的时间内人们就发现 NLCs 具有独特的电学和光学特性,是一种优良的光折变非线性光学材料,主要

收稿日期: 2010-02-28; 修订日期: 2011-04-11

基金项目: 黑龙江省自然科学基金资助项目(No. A200915); 黑龙江省教育厅科学技术研究资助项目(No. 12511493)

作者简介: 兰民(1963—), 男, 吉林四平人, 硕士, 副教授, 主要从事液晶材料非线性光学领域的研究。

* 通讯联系人, E-mail: renchangyu@126. com

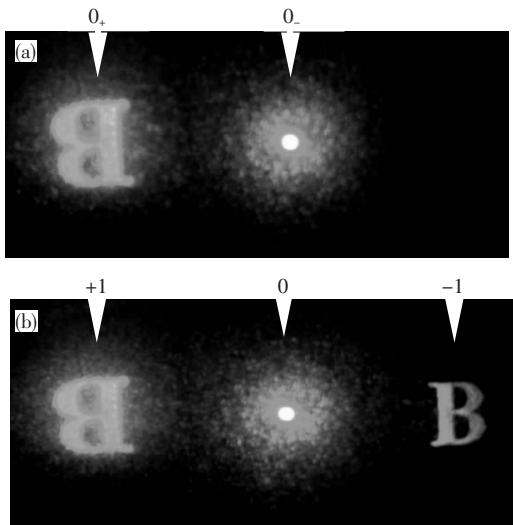


图 2 波长为 532 nm 时全息图像存储的照片。(a) 没有外加电压时只有信号光和参考光透射;(b) 外加电压为 1.8 V 时的自衍射图像。

Fig. 2 Photographs of holographic image storage with the 532 nm beam. (a) Transmission of object and reference beams with no dc voltage applied; (b) Diffracted patterns in the presence of the object and reference beam under the application of a dc voltage of 1.8 V.

几乎与原始像大小相同,如图 3 所示。当电压继续增大时强烈的动态散射使高阶衍射像的对比度明显降低。因此,实验时电压不能过高,我们一般控制电压不超过 3.5 V,长时间的高电压也会使液晶盒损坏。实验发现,温度低于相转移温度(23 ℃)时会抑制动态散射的强度。

由实验条件可知,液晶样品中形成光栅的条纹间距 $\Lambda=7.6\text{ }\mu\text{m}$, 无量纲参数 $Q=2\pi L\lambda/n_0\Lambda^2\approx 1.3$ (n_0 是液晶平均折射率),形成的光栅能产生 Raman-Nath 衍射,由标准的 Raman-Nath 衍射理论可知

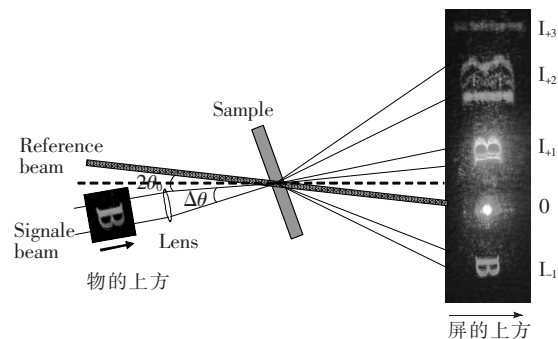


图 3 光栅高阶衍射图像

Fig. 3 Sketch of higher-order diffracted images of grating

参考光束两侧相应衍射阶的衍射光强应具有对称性,即 $I_{+i}=I_{-i}(i=1,2,3,\cdots)$ 。但在图像再现的实验中,衍射表现出非对称的特点,说明样品中形成的光栅有可能为非对称形貌。

实验发现,只有水平方向偏振(p-polarized)的相干写入光形成的折射率调制光栅才能有衍射出现;如果两束写入光是竖直偏振(s-polarized)或没有外加电压时都将没有衍射图像,衍射与光的偏振态及电压的依赖关系说明衍射光栅产生于光折变效应,而不是热致光栅等其他效应。

4 高阶全息图像的旋转与放大

实验液晶样品中记录的光栅属于 Raman-Nath 型,在光栅再现过程中会有高阶衍射图像出现,衍射像具有中心旋转对称特点,且高阶衍射图像会被放大。这里,我们给出高阶衍射图像横向放大的理论分析。为简单起见,我们采用记录光中的参考光读出全息图, m 阶衍射的再现像应满足以下关系:

$$\begin{aligned}\sin\theta_m &= (2m-1)\sin\theta_0 \\ m &= 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3\cdots\end{aligned}\quad (1)$$

$2\theta_0$ 为光束耦合角,即参考光束 I_R 与信号光束 I 之间的夹角, $\Delta\theta$ 为信号光束 I 与 II 之间夹角。图 4 给出高阶衍射(图 3)的原理图。

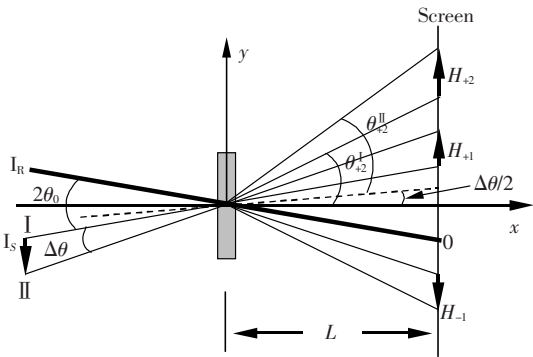


图 4 光栅高阶衍射图像原理图

Fig. 4 Sketch of higher-order diffracted images of grating and wave-vector diagram

我们假设参考光束与信号光束叠加在样品中,即认为样品放置在信号光束通过透镜的焦点平面上;还假设信号光束包含许多单个频率光束,与参考光束最近的为 I ,与参考光束最远的为 II ,在 $x-y$ 平面内所有信号光束都分别于参考光束产生干涉。因此,在样品中将形成多个光栅矢量

方向不同的光栅,高阶衍射像来自于高阶光栅的 Raman-Nath 衍射或基元光栅的高级 Bragg 衍射。由公式(1),光束 I 和光束 II 的 +2 阶衍射角可分别表示为如下关系:

$$\sin\theta_{+2}^I = 3\sin\theta_0 \quad (2)$$

$$\sin\theta_{+2}^{II} = 3\sin\left(\theta_0 + \frac{\Delta\theta}{2}\right) \quad (3)$$

同样,光束 I 和光束 II 的 -1 级衍射角可分别表示为如下关系:

$$\sin\theta_{-1}^I = -3\sin\theta_0 \quad (4a)$$

$$\sin\theta_{-1}^{II} = -3\sin\left(\theta_0 + \frac{\Delta\theta}{2}\right) \quad (4b)$$

不考虑样品倾斜的因素,假设光束聚集在样品中。在屏幕上,沿 x 轴方向 +2 阶和 -1 阶衍射像的宽度分别为:

$$H_{+2} = \left[\text{tg}\left(\theta_{+2}^{II} + \frac{\Delta\theta}{2}\right) - \text{tg}(\theta_{+2}^I) \right] L \quad (5a)$$

$$H_{-1} = \left[\text{tg}\left(\theta_{-1}^{II} - \frac{\Delta\theta}{2}\right) - \text{tg}(\theta_{-1}^I) \right] L \quad (5b)$$

而物的原始像+1 阶在屏幕上的宽度为:

$$H_{+1} = [\text{tg}(\theta_0 + \Delta\theta) - \text{tg}(\theta_0)] L \quad (6)$$

其中, L 为透镜焦平面与屏之间的距离。

放大衍射系数 γ 定义为高阶衍射像宽度 H_m 与 H_{+1} 之比,则放大系数 γ_{+2}, γ_{-1} 分别为:

$$\gamma_{+2} = \frac{H_{+2}}{H_{+1}} = \frac{\left[\text{tg}\left(\theta_{+2}^{II} + \frac{\Delta\theta}{2}\right) - \text{tg}(\theta_{+2}^I) \right]}{[\text{tg}(\theta_0 + \Delta\theta) - \text{tg}(\theta_0)]} \quad (7a)$$

$$\gamma_{-1} = \frac{H_{-1}}{H_{+1}} = \frac{\left[\text{tg}\left(\theta_{-1}^{II} - \frac{\Delta\theta}{2}\right) - \text{tg}(\theta_{-1}^I) \right]}{[\text{tg}(\theta_0 + \Delta\theta) - \text{tg}(\theta_0)]} \quad (7b)$$

假设 $2\theta_0$ 和 $\Delta\theta$ 较小,我们可以得到以下关系(大小):

$$\begin{aligned} \theta_{+2}^I &\approx 3\theta_0, & \theta_{+2}^{II} &\approx 3\left(\theta_0 + \frac{\Delta\theta}{2}\right) \\ \theta_{-1}^I &\approx 3\theta_0, & \theta_{-1}^{II} &\approx 3\left(\theta_0 + \frac{\Delta\theta}{2}\right) \end{aligned} \quad (8)$$

方程(7a)和(7b)可简化为:

$$\gamma_{+2} = \frac{H_{+2}}{H_{+1}} = \frac{\left[\text{tg}\left(\theta_{+2}^{II} + \frac{\Delta\theta}{2}\right) - \text{tg}(\theta_{+2}^I) \right]}{[\text{tg}(\theta_0 + \Delta\theta) - \text{tg}(\theta_0)]} = 2 \quad (9)$$

$$\gamma_{-1} = \frac{H_{-1}}{H_{+1}} = \frac{\left[\text{tg}\left(\theta_{-1}^{II} - \frac{\Delta\theta}{2}\right) - \text{tg}(\theta_{-1}^I) \right]}{[\text{tg}(\theta_0 + \Delta\theta) - \text{tg}(\theta_0)]} = 1 \quad (10)$$

即,+2 阶衍射像是基频图像的 2 倍,-1 阶衍射像与基频像大小相同。理论计算结果与实验观测

非常符合。

对于第 $m(m=0, 1, 2, 3\cdots)$ 阶(信号光一侧)高阶衍射图像, $\theta_{+m}^{II} \approx (2m-1)\left(\theta_0 + \frac{\Delta\theta}{2}\right)$, $\theta_{+m}^I \approx (2m-1)\theta_0$, 像的横向大小为:

$$H_{+m} = \left[\text{tg}(\theta_{+m}^{II} + \frac{\Delta\theta}{2}) - \text{tg}(\theta_{+m}^I) \right] L \approx m\Delta\theta L \quad (11)$$

高阶衍射图像的大小与透射图像相比为 $H_m/H_{+1} \approx m$ 。

对于第 - $m(m=0, 1, 2, 3\cdots)$ 阶(参考光一侧)高阶衍射图像,同样可得出:

$$H_{-m} = \left[\text{tg}(\theta_{-m}^{II} - \frac{\Delta\theta}{2}) - \text{tg}(\theta_{-m}^I) \right] L \approx (m-1)\Delta\theta L \quad (12)$$

高阶衍射图像的大小与透射图像相比为 $H_{-m}/H_{+1} \approx m-1$ 。

由此可见,信号光一侧的高阶衍射图像的大小是基频图像的整数倍,当 $m=1$ 时就是基频图像;参考光一侧的高阶衍射图像的大小也是基频图像的整数倍,当 $m=1$ 时,就是参考光。在实验中,如果物光汇聚透镜焦点与参考光相交于样品前面或者后面,高阶衍射图像大小也可用此方法进行分析。

实验中,由于向列相液晶中形成的光栅为薄折射率调制相位光栅,由薄光栅标量衍射理论可知,参考光两侧的衍射像具有中心对称特性,即产生 180° 旋转。从傅里叶变换全息的角度来看,实验中记录的是傅里叶全息图,每个基元光栅可在 ± 1 阶衍射方向再现其相应的物光波平面波分量及其共轭,傅里叶变换的复共轭像与原物像互成镜像。因此, $(-1, -2\cdots)$ 阶光栅衍射图像相对于基频衍射图像是 180° 旋转。

5 结 论

研究了向列相液晶(5CB: C₆₀) 的全息存储特性,并在实验和理论上对高阶衍射像进行了分析。在实验中观察到了清晰的全息衍射图像,光栅读出过程中会有高阶衍射出现,在远离样品的观察屏上可观察到高阶衍射像,表明样品具有良好的全息存储能力。从理论上对衍射像进行分析,结果表明, +1, +2 $\cdots$ 阶的衍射像被放大,而另一侧 -1, -2 $\cdots$ 阶的衍射像虽没放大,但产生了 180° 旋转。向列相液晶中取向光

折变光栅的这种特性为光学信息处理领域提供了一种简单的图像放大和旋转方法。随着对向列相液晶中取向光折变效应的深入研究, 不仅能帮助揭示光栅的物理机制, 还将有助于拓展

向列相液晶中取向光折变光栅新的应用领域, 例如: 光学系统畸变的全息矫正、调控激光束的空间结构以及衍射耦合器件等光子学器件。

参 考 文 献:

- [1] Rudenko E V, Sukhov A V. Optically induced spatial charge separation in a nematic and resultant orientational non-linearity [J]. *JETP*, 1994, 78(6):875-882.
- [2] Khoo I C, Lang H L. Observation of orientational photorefractive effects in nematic liquid crystals [J]. *Opt. Lett.*, 1994, 19 (21):1723-1725.
- [3] Wiederricht G P. Photorefractive liquid crystal [J]. *Annu. Rev. Mater. Res.*, 2001, 31:139-169.
- [4] 宋静, 栗宏亮, 刘永刚, 等. 偶氮苯聚合物掺杂液晶光栅的研究 [J]. *液晶与显示*, 2010, 25(5):689-692.
- [5] 任常愚, 蔡吉花, 金永君, 等. 掺杂 C60 向列相液晶全息光栅衍射增强的研究 [J]. *光学学报*, 2011, 31(2): 0216002-1-7.
- [6] 李伯符. 液晶物理——电场对液晶的作用与液晶的光学性质 [J]. *液晶与显示*, 2001, 16(3):228-239.
- [7] 邓罗根, 罗丽媛. 染料掺杂液晶中光致分子重新取向问题的研究进展 [J]. *液晶与显示*, 2005, 20 (6):481-487.
- [8] Khoo I C. *Liquid Crystals: Physical Properties and Nonlinear Optical Phenomena* [M]. New York: Wiley and Sons. 1995.
- [9] Gunter P, Huignard J P. *Photorefractive Materials and their Applications: Fundamental Phenomena* [M]. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 1988.
- [10] Khoo I C, Wood M V, Shih M Y. Extremely nonlinear photosensitive liquid crystals for image sensing and sensor protection [J]. *Optics Express*, 1999, 4(11):432-442.
- [11] Shih M Y, Shishido A, Chen P H, *et al.* All-optical image processing with a supranonlinear dye-doped liquid-crystal film [J]. *Opt. Lett.*, 2000, 25(13):978-980.
- [12] Lee W, Wang Y L. Evidence for holographic image storage in a fullerene-doped liquid-crystal film [J]. *Chin. J. Phys.*, 2001, 39(4):295-298.
- [13] Ono H, Kawamura T, Kawatsuki N, *et al.* Intensity filtering of a two-dimensional optical Image in high-performance photorefractive mesogenic composites [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2001, 79(7): 895-897.