

# 向列相液晶动态全息存储特性的研究\*

任常愚<sup>1,2</sup> 孙秀冬<sup>1</sup>

(1 哈尔滨工业大学 应用物理系, 哈尔滨 150001)

(2 黑龙江科技学院 数力系, 哈尔滨 150027)

**摘要** 研究了C<sub>60</sub>掺杂向列相液晶中全息光栅的形成, 实验中我们利用了一种特殊的全息再现方法: 即低电压记录, 高电压再现, 观察到清晰的全息再现像. 实验结果表明样品具有良好的全息存储能力. 分析了电压对实验结果的影响, 实验表明: 为了避免动态散射的出现应使用较低记录电压, 而再现时应采取高电压以重新激发隐藏的光栅, 提高再现的质量.

**关键词** 非线性光学; 全息; 向列相液晶; 取向光折变效应

**中图分类号** O753+.2 **文献标识码** A

## 0 引言

液晶作为一种光学材料人们对其研究已有十几年, 由于其独特的光折变非线性在动态全息、图像放大、光限幅、相位共轭和其他光学信息处理技术等领域具有广泛的应用前景<sup>[1-3]</sup>. 自第一次预言并观察到向列相液晶的取向光折变效应以来<sup>[4,5]</sup>, 这种材料的光折变非线性已有了很大的提高. 在实际应用中人们设计了不同的液晶系统, 也表现出不同的光学特性: 如, 为了提高样品存储图像的分辨率 A. Golemme<sup>[6]</sup> 设计了聚合物分散液晶 (PDLC), Wiederrecht<sup>[7]</sup> 提出了聚合物稳定液晶 (PSLC) 系统. 王长顺等<sup>[8-10]</sup> 对偶氮聚合物液晶薄膜中实现永久光学存储的可能性进行了研究, 并分析了永久性光学存储的物理机制. 对于光折变材料的不同应用要求材料具有不同的响应特性, 高密度存储材料需要很强的电光响应、高分辨率; 动态全息需要响应时间很短而电光响应效率很高的材料. 对于低摩尔质量向列相液晶系统虽然目前还不适于高密度全息存储, 但是大的光学各向异性 and 对外加电场的迅速响应的特性使液晶材料非常适合于产生相位全息光栅及进行动态全息处理. 这种材料在很低的电场 ( $\sim 0.1 \text{ V}/\mu\text{m}$ ) 和光强 ( $\sim \text{mW}$ ) 下产生很大的自相位调制和能量耦合的特点在实际应用中具有很强的诱惑力. 而且, 液晶盒较容易制作的优点为这种材料在实际中的应用创造了有利条件. 2001年 Wei-Lee<sup>[11]</sup> 等报道了 E7 掺杂 C<sub>60</sub> 向列相液晶中存储了可辨别的全息像. 但是据本人所知关于低摩尔质量向列相液晶全息图像存储及再现方面的报道到目前为止还是很少, 主要原因就

是, 用传统的方法再现时光栅被擦除的很快, 很难观察到清晰的再现像.

本文研究了低摩尔质量向列相液晶系统 (5CB:C<sub>60</sub>) 在进行二维图像的记录和再现时的有关问题, 成功地记录了全息图, 采用特殊的方法再现了清晰的全息图像并分析了再现机制.

## 1 实验

### 1.1 材料

本实验所用材料为向列相液晶 5CB (4-cyano-4'-n-pentylbiphenyl) 掺杂 C<sub>60</sub> (0.1 wt. %), 其中 C<sub>60</sub> 为光敏剂, 可增强液晶的导电性. 清洗后的导电玻璃经表面处理相对粘好用聚酯膜控制导电玻璃的间隔为 20  $\mu\text{m}$ , 在液晶相时将向列相液晶注入到盒内, 然后缓慢降到室温, 这样就做成厚度为 20  $\mu\text{m}$  垂直排列的液晶盒.

### 1.2 实验装置

图 1 是实验中用于全息图像记录和再现的光路图. 所用的光源为半导体激光器, 波长为 532 nm, 水平方向偏振, 分束镜 (BS) 将光源发出的光分为物光和参考光. M 为反射镜, SLF 为空间光滤波器, 可产生扩散光源. L 是焦距 300 mm 的傅里叶透镜, 可使所加的物在液晶盒上汇聚, 液晶合平面垂直于水平面放置, 液晶指向矢与参考光和物光角分线的交角为 45°. 在液晶盒的两极加上直流电压, 形成的电

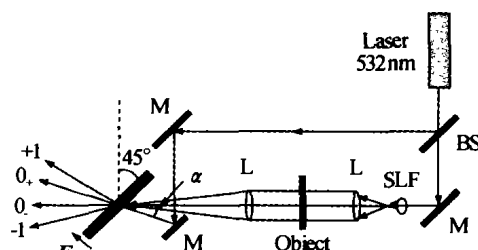


图 1 全息记录实验光路图  
Fig. 1 Optical setup for holographic recording experiment

\* 黑龙江省留学回国基金 (LC01C11) 与国防基础科研项目资助

Tel: 0451-86414129 Email: cyren@hit.edu.cn

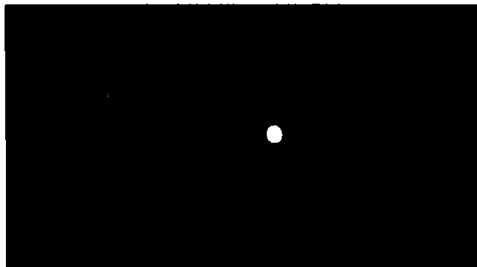
收稿日期: 2004-11-15

场大约是  $0.1 \text{ V}/\mu\text{m}$ , 方向如图 1. 物光和参考光的夹角为  $\alpha$ , 因此形成光栅的条纹间距 ( $\Lambda$ ) 可通过  $\Lambda = \lambda/2\sin(\alpha/2)$  计算. 其中,  $\lambda$  是波长.

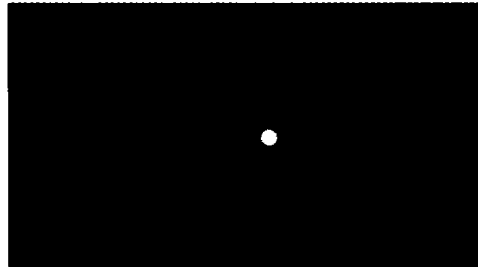
## 2 结果与讨论

### 2.1 图像的全息记录

全息图像记录的光路图如图 1, 所记录的物体是一个镂空的字母“B”, 照射在样品上物光的功率为  $I_0 = 0.85 \text{ mW}$ , 参考光的功率为  $I_R = 3.5 \text{ mW}$ . 在样品上光斑直径为  $2 \text{ mm}$ , 两光束的夹角为  $4^\circ$ , 液晶盒放在离焦面上, 如果放在焦平面上因光强过大将



(a) Transmission of writing and reference beams



(b) Hologram

图 2 透射和全息记录的照片

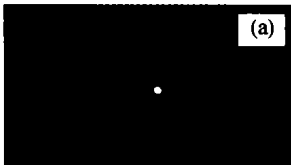
Fig. 2 Pictures of transmission and hologram

### 2.2 图像的全息再现

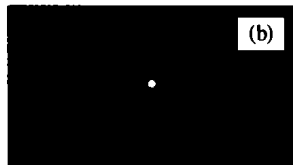
光路图如图 1, 记录时所用光源波长为  $532 \text{ nm}$ , 沿水平方向偏振. 照在样品上物光的功率为  $I_0 = 0.83 \text{ mW}$ , 参考光的功率为  $I_R = 3.3 \text{ mW}$ . 在样品上光斑直径为  $2 \text{ mm}$ , 电压为  $1.5 \text{ V}$ , 时间为  $2 \text{ min}$ , 记录

会产生散射现象, 所加电压为伏  $1.5 \text{ V}$ . 图 2 是透射全息图像的记录照片. 实验时如果只有物光和参考光照射在液晶盒上, 不加电压时只能看到通过液晶盒的透射光, 图 2(a). 当液晶盒加上直流电场时就可看到衍射出现. 从图 2 (b) 中可看出在照片的右侧观察到了清晰的  $+1$  级衍射像 ( $+1$  级是与原物方位相同的像,  $0$  级是反转倒立的透射像) 而不是物体在液晶盒中存储聚焦像的再现, 这就说明在液晶中形成了光栅, 且再现的像并没有明显的失真现象. 由于实验时光照射时间超过  $2 \text{ min}$ , 可认为在液晶盒中形成了较稳定的光栅.

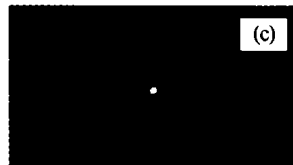
的衍射像如图 3(a). 图 3 (b), (c) 和 (d) 分别是挡住物光束时电压分别为  $1.5 \text{ V}$ ,  $1.8 \text{ V}$  和  $2.0 \text{ V}$  的再现像. 可以看到当电压不变挡住物光直接再现时几乎观察不到再现的像, 因为在挡住物光的同时光栅被迅速擦除, 因此  $+1$  级衍射的像迅速消失. 采取



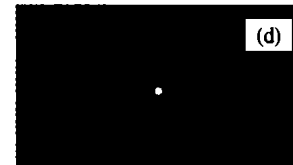
(a)



(b)



(c)



(d)

图 3  $+1$  级衍射像 (a)  $1.5 \text{ V}$  和不同电压时的再现像 (b)  $1.5 \text{ V}$ ; (c)  $1.8 \text{ V}$ ; (d)  $2.0 \text{ V}$

Fig. 3  $+1$  order diffracted image (a),  $1.5 \text{ V}$  and reconstructed images of the hologram in liquid crystal cell (b)  $1.5 \text{ V}$ , (c)  $1.8 \text{ V}$ ; (d)  $2.0 \text{ V}$

以下方法可以实现全息图像的再现.

1) 用较低的电压记录 (如  $1.5 \text{ V}$ ).

2) 然后同时挡住物光和参考光, 将电压调到较高的值 (如  $1.8 \text{ V}$ ), 一般情况下再现电压比记录电压要高  $0.2 \text{ V}$  左右, 关闭电源.

3) 此时挡住物光让参考光照在液晶盒上, 打开电源时可观察到再现的衍射像, 持续时间大约为  $2 \sim 5 \text{ s}$ . 用数码相机可记录下清晰的再现像.

### 2.3 对再现过程的讨论

液晶取向光折变效应中驱动液晶分子指向矢转动的空间电荷场主要有两个来源<sup>[12]</sup>. 而扩散电荷产生的空间电荷场  $E_{ph}$  的强度要比由介电常数各项异性和电导率各项异性产生的电荷场  $E_{(\Delta\sigma, \Delta\epsilon)}$  大近一个数量级. 这就是说, 一旦挡住物光用一束光去再现时由于离子的复合作用强度光栅迅速减弱, 液

晶中的总空间电荷场迅速降到较小的值, 折射率光栅变得很弱, 很难观察到衍射像.

但是液晶中还存在电场  $E_{(\Delta\sigma, \Delta\epsilon)}$ , 或者说液晶中的折射率光栅依然存在, 就好像被隐藏了. 液晶盒的“记忆”性与来自排列层面的离子在电光作用下的吸收/解吸有关. 在外加电场和参考光的作用下, 表面层附近的液晶和直流电场之间的作用能超过表面的锚定能使液晶指向矢重新取向. 当光场和外加电场的作用时间达到几分钟时, 这种取向是不可逆的, 即使电场和光场去掉这个取向也不能完全恢复. 如果突然施加外电场则可重新激发隐藏的光栅, 也就是说使液晶分子的指向矢再次取向, 产生折射率的调制. 取向角的大小与外加电场满足如下关系式<sup>[4]</sup>

$$\theta_0 = \frac{\Delta\epsilon E_{dc} E_{sc}}{16\pi k} \cos \beta (dz - z^2) \quad (1)$$

折射率的调制表示为<sup>[12]</sup>

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

从关系式(1)和(2)可看出,取向角与外加电场成正比,电压越大取向角越大,折射率调制也增大,衍射

光强必然增大. 实验中发现再现的电压要比记录电压高 0.2 V 左右才能观察到明显的衍射像,为了避免再现时出现散射现象采用低电压记录是较好的选择. 图 4 显示了在不同电压时再现的 +1 级衍射强度与电压的关系.

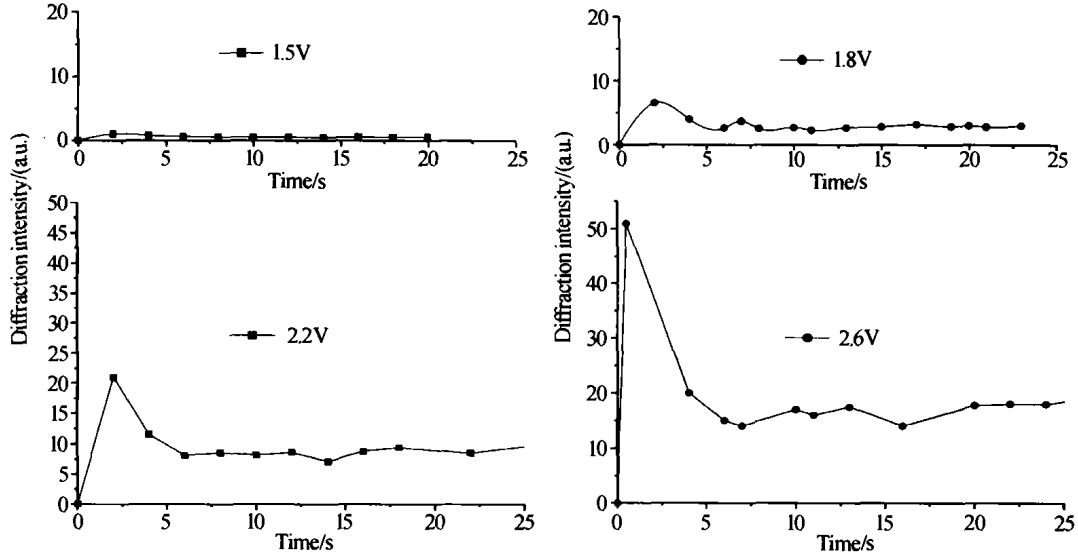


图 4 +1 级衍射强度与再现电压的关系  
Fig. 4 First-order diffraction intensity as a function of applied voltage

从图 4 可看出再现时 +1 级的衍射光强的变化规律是一样的,即在很短的时间内(1~2 s)达到极大的衍射强度然后迅速衰减到一个基本稳定的值. 不同点就是再现电压增大时最大衍射强度和稳定衍射强度相对较大. 对此现象的解释是:

再现的过程中存在两种竞争机制:一是空间电荷场  $E_{ph}$  的衰减;二是空间电荷场  $E_{(\Delta\sigma, \Delta\epsilon)}$  和外加直流电场  $E_{dc}$  的瞬间增强. 液晶分子取向则由(1)确定. 由于液晶的粘滞阻力的作用每种过程都不可能

在瞬间完成,外加电场  $E_{dc}$  越大  $E_{sc}$  响应时间越短<sup>[13]</sup>,满足式(3).

$$\tau_r = \frac{\eta}{\epsilon_0 |\Delta\epsilon| E_{dc}^2 - k\pi^2 / \Delta^2} \quad (3)$$

图 5(a)显示了再现时空间电荷场  $E_{sc}$  的变化情况,图 5(b)则表示的是有电压时液晶盒中直流场  $E_{dc}$  的变化情况,两种情况同时存在的结果即液晶分子取向角的变化就是图 5(c)的情形. 理论分析与在实验中观察到的现象正好吻合.

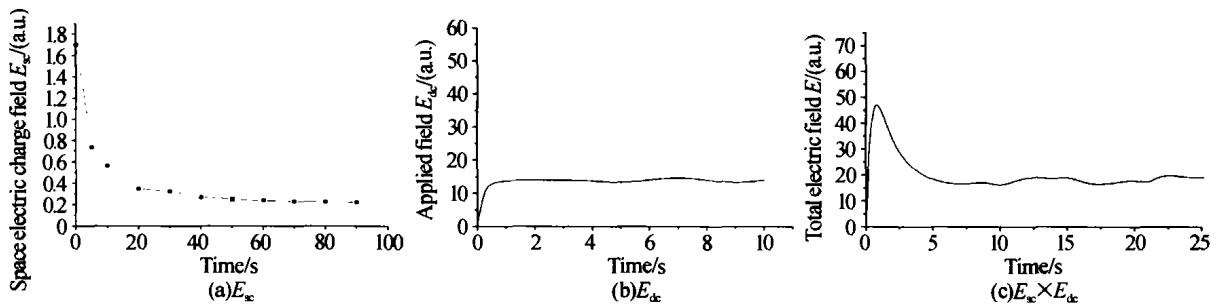


图 5 再现过程中液晶盒空间电荷场的变化情况  
Fig. 5 The change of space electric field of the LC-cell on the process of reconstruction

由于实验中所用的样品为低摩尔质量向列相液晶(5CB),所形成光栅为薄(Raman-Nath)光栅目前来看很难形成永久光栅,因此不适于长时间数据存储方面的应用,从再现过程也可以看出衍射光经历了瞬间增强之后就衰减到很低的水平上. 但是由于很强的非线性和不断改进的响应时间,在动态全息领域如:图像识别、传感器保护等方面会有很广的应

用前景.

### 3 结论

研究了向列相液晶(5CB:C<sub>60</sub>)的全息存储特性. 在实验中利用了一种特殊的全息再现方法,即低电压记录,高电压再现,通过这种方法观察到了清晰的全息记录和再现像,表明样品具有良好的全息存储

能力. 最后分析了电压对实验结果的影响, 实验表明为了避免动态散射的出现应使用较低的记录电压, 而再现时应采取高电压以重新激发隐藏的光栅, 提高再现的质量. 随着对向列相液晶中光栅形成机制的不断研究、光栅响应时间和分辨率的不断改进、衍射效率的不断提高, 这种新近发现的全息记录材料以其大双折射性和易取向性以及低电压和低成本有望成为动态全息领域的理想材料.

### 参考文献

- 1 Khoo I C. Liquid crystal: Physical properties and nonlinear optical phenomena. New York: Wiley interscience, 1994. 241 ~ 289
- 2 Khoo I C, Wood M V, Shih M Y. Extremely nonlinear photosensitive liquid crystals for image sensing and sensor protection. *Optics Express*, 1999, 4(11): 432 ~ 442
- 3 杨立功, 顾培夫. 液晶投影显示中分色合色膜系空间角度特性的研究. *光子学报*, 2003, 32(1): 117 ~ 120  
Yang L G, Gu P F. *Acta Photonica Sinica*, 2003, 32(1): 117 ~ 120
- 4 Khoo I C, Li H, Liang Y. Observation of orientational photorefractive effects in nematic liquid crystals. *Opt Lett*, 1994, 19(21): 1723 ~ 1725
- 5 Rudenko E V, Sukhov A V. Photoinduced electrical conductivity and photorefractive effects in a nematic liquid crystal. *JETP Lett*, 1994, 59: 142 ~ 146
- 6 Golemme A, Volodin B L, Kippelen B, et al. Photorefractive polymer-dispersed liquid crystals. *Opt Lett*, 1997, 22(16): 1226 ~ 1228
- 7 Wiederrecht G P, Wasielewski M R. Photorefractivity in polymer-stabilized nematic liquid crystals. *J Am Chem Soc*, 1998, 120: 3231 ~ 3236
- 8 王长顺, 杨廷强, 邱勇, 等. 偶氮苯侧链聚合物液晶薄膜的光致双折射和永久光学性存储研究. *光子学报*, 1998, 27(10): 906 ~ 910  
Wang C S, Yang Y Q, Qiu Y, et al. *Acta Photonica Sinica*, 1998, 27(10): 906 ~ 910
- 9 夏锦红. 偶氮苯侧链液晶聚合物薄膜中图象存储的光学控制. *光子学报*, 1999, 28(10): 933 ~ 936  
Xia J H. *Acta Photonica Sinica*, 1999, 28(10): 933 ~ 936
- 10 冯忠耀, 忽满利, 马辉, 等. 氮苯共偶氮苯共聚 PMMA 薄膜的光致双折射特性研究. *光子学报*, 2004, 33(8): 974 ~ 977  
Feng Z Y, Hu M L, Ma H, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2004, 33(8): 974 ~ 977
- 11 Lee W, Wang Y L. Evidence for holographic image storage in a fullerene-doped liquid-crystal film. *Chin J Phys*, 2001, 39(4): 295 ~ 298
- 12 Khoo I C. Orientational photorefractive effects in nematic liquid crystal films. *IEEE J of Quantum Electronics (USA)*, 1996, 32(3): 525 ~ 534
- 13 Ono H, Kawatsuki N. Response characteristics of high-performance photorefractive liquid crystals. *Jpn J Appl Phys*, 1999, 38: 737 ~ 740

## Study on the Dynamic Holographic Storage Characteristics in C<sub>60</sub>-doped Nematic Liquid Crystal

Ren Changyu<sup>1,2</sup>, Sun Xiudong<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Dept. of Applied Physics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001

<sup>2</sup> Dept. of Mathematics and Mechanics, Heilongjiang Institute of Science and Technology, Harbin 150027

Received date: 2004-11-15

**Abstract** The holographic grating formation induced by an input pattern in company with a reference wave in a fullerene-doped nematic liquid crystal film were studied experimentally. In experiment we employed a particular method in order to reconstruct the hologram, namely recorded the hologram under low voltage and reconstructed the hologram by high voltage. Evidence concerning the reconstruction of holograms indicates that this photorefractive liquid crystal can, indeed, serve as a hologram-recording medium. Finally, we analyzed the reconstruction mechanism.

**Keywords** Nonlinear optics; Holography; Nematic liquid crystal; Orientational photorefractive effect

**Ren Changyu** received the B. S. degree in physics from the Physics Department at Huaibei Coal Industry Teachers College in 1986. Since July 1986, he has been working at Heilongjiang Institute of Science and Technology. He is currently working towards the Ph. D. degree in the Department of Applied Physics, Harbin Institute of Technology, where his research concerns optical information processing of low molar mass nematic liquid crystal.

