

# 无偏置交流电场下向列液晶中的耦合增益特性

裴延波 姚凤凤 孙秀冬

(哈尔滨工业大学物理系, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘要** 用交流电场代替直流电场来驱动液晶光折变器件能够克服直流电场带来的动态散射、永久光栅、电解等效应, 这些对于器件的实用是非常不利的。利用二波耦合方法在无偏置正弦交流电场作用下研究了掺  $C_{60}$  的向列液晶中记录的光折变光栅的形成及其相干放大应用。实验中在交流电场作用下于通常的、掺  $C_{60}$  的向列液晶盒中观察到了稳定的非对称能量转移, 并获得了和直流电场下相比拟的、大的光束耦合比, 从而证明在交流电场下液晶薄膜中记录的光栅是由光致空间电荷场作用下的液晶分子重新取向而形成的。利用上述强的光束耦合比实现了交流电场作用下的相干放大实验, 并在小的输入光强下取得了  $190 \text{ cm}^{-1}$  的增益。

**关键词** 非线性光学; 相干放大; 二波耦合; 向列液晶; 全息术

**中图分类号** O753+.2 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092912.3494

## Coupling Properties in Nematic Liquid Crystal under Nonbiased Alternating Electric Field

Pei Yanbo Yao Fengfeng Sun Xiudong

(Department of Physics, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China)

**Abstract** Driving liquid crystal photorefractive devices with an alternating electric field instead of the dc electric field can overcome some disadvantages induced by the use of the dc electric field, such as the dynamic scattering, permanent grating, and electrolyte. The formation and the application of coherent amplification of gratings recorded in  $C_{60}$ -doped nematic liquid crystal under nonbiased sinusoidal alternative electric field were investigated by using two-beam-coupling experiment. Stable asymmetric energy transfer between two writing beams was observed in this kind of cell, indicating the photorefractive nature of the grating recording in nematic sample under the ac electric field. Large beam-coupling ratio was obtained, and the value was compared with that at a dc electric field. Finally the coherent amplification was realized, and the gain coefficient as high as  $190 \text{ cm}^{-1}$  was achieved.

**Key words** nonlinear optics; coherent amplification; two-beam coupling; nematic liquid crystal; holography

### 1 引 言

光折变效应是指在非均匀光照下通过空间电荷场的形成和电光非线性导致的折射率空间调制。因为光折变材料具有操纵光的能力, 所以这种材料在图像处理、光学存储、可编程光互联和神经网络模拟等领域有着潜在的应用<sup>[1]</sup>。自 1994 年液晶中的光折变效应第一次被报道, 它以与聚合物光折变材料相比小得多的直流电压引起了人们极大的关注<sup>[2~4]</sup>。并且液晶中的光栅由于其电场可控性在光

开关、投影显示、光学信息处理、衍射光学等领域有着潜在的应用<sup>[5,6]</sup>。研究认为液晶的光折变过程包括光致载流子的激发和扩散而形成空间电荷场, 以及在空间电荷场的作用下形成取向折射率光栅。在随后的十几年里, 液晶光折变材料的性能通过选择容易取向的液晶和优化电荷产生剂得到了极大的提高, 在很低的直流电压、很弱的输入光强下衍射效率、光束耦合比都几乎达到理论上的极限值<sup>[7~12]</sup>。但是, 在上述研究过程中, 人们也发现了一些致命的

收稿日期: 2008-10-13; 收到修改稿日期: 2008-11-21

基金项目: 哈尔滨工业大学科研创新基金(HIT, NSRIF 200802) 资助课题。

作者简介: 裴延波(1977—), 男, 博士, 讲师, 主要从事液晶材料、光折变非线性光学方面的研究。

E-mail: peiyanbo@hit.edu.cn

问题,例如:直流电场导致的动态散射,直流电场导致的电解作用,表面电荷效应导致的对表面处理的高度依赖性和对使用历史的依赖,电荷沉积导致的永久光栅等。这些问题都与液晶样品所需的直流电压有关。

2006年,Song等<sup>[13]</sup>提出了一种新的思路来解决上述问题。他利用交流电压来代替直流电压,在液晶中取得了与直流电场下相比拟的光折变响应,并且克服了上述直流电场所导致的所有问题。但是,作者没有在二波耦合实验中观察到稳定能量转移,他据此推测在交流电场的作用下,液晶中形成的是交流的空间电荷场。Lucchetti等<sup>[14]</sup>通过在样品上加偏置的低频交流电场,也较好的克服了以上问题,同时取得了非常高的非线性系数,但是他没有观察二波耦合现象。Kesti等<sup>[15]</sup>通过制作非对称的液晶盒结构实现了无偏置交流电场下稳定的增益。

本文观测了无偏置正弦交流电场作用下掺 C<sub>60</sub> 的向列液晶中记录的光栅的自衍射现象随入射光的偏振和交流电场的频率的依赖关系,并在二波耦合实验中发现了稳定的非对称能量转移,其能量耦合比可与直流电场下测得的值相比拟。最后,利用液晶盒中的耦合特性,我们首次在交流电场下实现了光学相干放大。

## 2 实 验

### 2.1 材料

使用的向列液晶为 E7,掺杂为 C<sub>60</sub>。E7 是一种常用的、廉价的向列液晶混合物,它的清亮点在 61 °C,凝固点在一 10 °C。把质量分数为 0.05% 的 C<sub>60</sub> 加到液晶中,放置一周后取上层稳定的液晶溶液注进液晶盒中。通过在氧化锡(Indium-tin-oxide ITO)玻璃表面上镀一层 HTAB (Hexadecyl trimethyl ammonium bromide)膜来使液晶分子垂直于表面排列。该液晶薄膜的平均折射率  $n$  为 1.6。我们制作的液晶盒的厚度  $d$  为 60  $\mu\text{m}$ 。

### 2.2 实验装置

图 1 是实验中使用的二波耦合光路。光源为氩离子激光器发出的 488 nm 的蓝光,分束镜(BS)将入射的 488 nm 的蓝光分为两束记录光  $I_1$  和  $I_2$ ,二者以大约 0.5° 的夹角相交于样品上,对应的干涉条纹的间距  $\Lambda$  大约为 60  $\mu\text{m}$ 。M<sub>1</sub>~M<sub>3</sub> 为反射镜。两束光在样品处的直径都是 2 mm,样品的法线与两束记录光的角平分线的夹角为 45°。使用信号发生器做交流电源,该电压通过 ITO 导电膜施加到液晶

薄膜上。在以下的实验中,如果没有特殊说明,液晶盒两极所加的电压是频率为 50 Hz 的无偏置正弦交流电压。

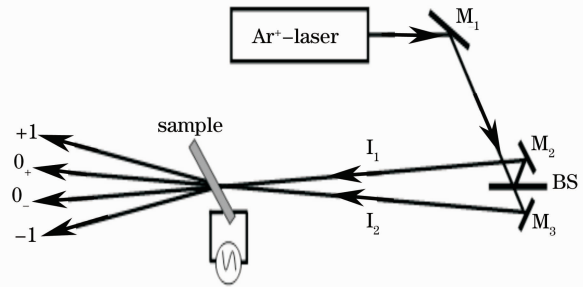


图 1 二波耦合实验光路图

Fig. 1 Experimental geometry for two-beam coupling

## 3 结果与讨论

### 3.1 薄光栅中的自衍射现象

根据无量纲  $Q$  因子 ( $Q = 2\pi\lambda L/n\Delta^2$ , 其中  $\lambda$  为波长 (488 nm),  $L$  为光栅的厚度) 可知:在上述实验配置下有  $Q = 0.045 \ll 1$ ,说明液晶盒中记录的光栅工作在 Raman-Nath 机制下。在这种机制下,二波耦合将会出现多阶衍射。固定记录光的总功率为 3 mW,无偏置正弦交流电压的频率为 50 Hz,观察蓝光的自衍射现象随外加交流电压的峰-峰值的变化。当两束记录光不含 p 偏振分量时,我们观察不到自衍射现象;当两束记录光均为 p 偏振光时,外加交流电压的峰-峰值高于 3 V 以后就能观察到明显的自衍射现象。另外,没有外加交流电压就观察不到自衍射现象,即没有外加交流电场就不能记录光栅。图 2 给出了频率为 50 Hz,峰-峰值为 12 V 时的自衍射图样,此时能够观察到正负 4 阶衍射。

设定记录光均为 p 偏振光,下面观察蓝光的自衍射现象随外加无偏置正弦交流电压的频率的变化。当频率在 5 Hz 以下,高阶衍射光的强度将随着交流电压的周期振荡而闪烁。当交流电压的频率继续增加时,高阶衍射强度不再随着交流电压的周期振荡而闪烁,并且各阶衍射强度在频率增加到 100 Hz 左右的过程中没有发生明显变化。在交流电压的频率高于 100 Hz 后,各阶衍射强度开始逐渐变弱,到 300 Hz 时衍射基本消失。

### 3.2 二波耦合实验研究

为了确认液晶薄膜中记录光栅的起因,我们测量了 50 Hz 的外加无偏置正弦电压作用下两束记录光的透射强度随时间的演化情况,即观察了两束记录光在样品中的耦合情况。图 3 给出了交流电压峰-峰值

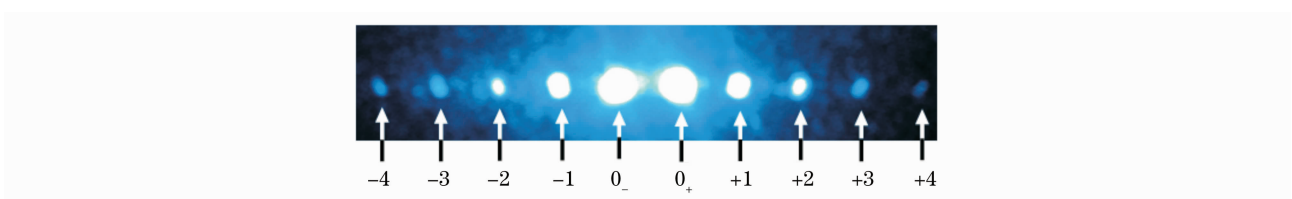


图 2 正弦交流电场作用下的自衍射图样

Fig. 2 Self-diffraction pattern under the application of a sinusoidal ac field

为 8 V 时记录光栅过程中两束等强度的记录光的透射光强度随时间的变化。我们可以看出一束光被放大,另一束光被衰减,这说明记录的光栅是非局域性的。由图中可以看出,实验中获得了和直流电场下相比拟的光束耦合比(当两束记录光强度相等的条件下,光束耦合比定义为被放大的透射光在耦合后与发生耦合前的强度比),其值高达约 1.4。结合上面观察到的记录光栅和读出光栅的条件,所记录的光栅为光折变性质的,即该光栅是由光致液晶分子重新取向而形成的。据此推测形成空间电荷场的主要原因是光激发载流子的扩散而不是在交流电场作用下的漂移。在这里交流电压的周期等于 20 ms,而光栅的建立时间在 10 s 左右,在交流电压的一个周期内交流电压对载流子的驱动作用平均为 0。由于交流电压的周期远大于光生载流子的寿命,故交流电场会起到和直流电场同样的作用,即帮助电荷分离。光激发的载流子会因为空间密度梯度而扩散,形成稳定的直流空间电荷场,其与干涉条纹具有  $\pi/2$  的相移,从而导致了稳定的、非对称的能量转移。

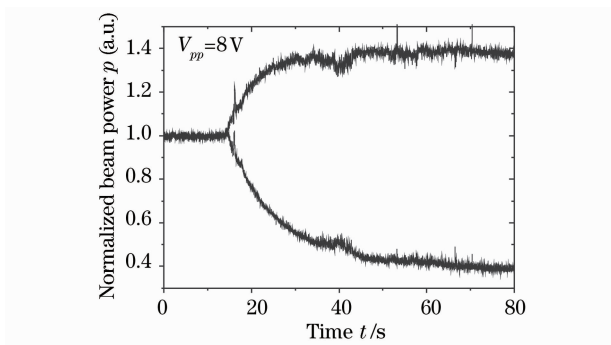


图 3 非对称二波耦合动态演化曲线

Fig. 3 Dynamic evolution of asymmetric two-beam coupling

### 3.3 交流电场作用下液晶薄膜中的光学相干放大

在制备的掺杂  $C_{60}$  的向列液晶 E7 中,二波耦合实验说明在交流电场作用下记录的光栅具有稳定的非对称能量转移,且具有和直流电场下相比拟的、大的光束耦合比。利用这一特性,在无偏置正弦交流电场作用下进行了相干放大实验。小信号增益系数

$\Gamma$  定义为

$$\Gamma = \frac{1}{d} \ln \left( \frac{I'_s I_p}{I_s I'_p} \right), \quad (1)$$

其中  $I_p$ ,  $I'_p$  分别为信号光存在时和信号光不存在时透过样品后抽运光的功率;  $I_s$ ,  $I'_s$  分别为抽运光存在时和抽运光不存在时透过样品后信号光的功率。固定抽运光和信号光的功率比为 5:1,我们测量了信号光的增益系数  $\Gamma$  随着入射光总功率的变化,如图 4 所示(对应的外加频率为 50 Hz 的正弦交流电压的峰-峰值等于 8 V)。由图可知,  $\Gamma$  初始随着入射光总功率的增加而增加;在入射光总功率达到 20 mW 后  $\Gamma$  达到最佳值 ( $\Gamma \approx 190 \text{ cm}^{-1}$ );之后,  $\Gamma$  基本上不随着入射光总功率的增加而改变。

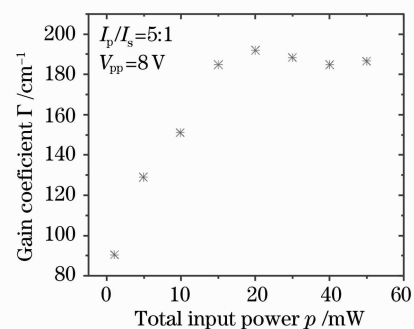


图 4 小信号增益系数随着入射光总功率的演化

Fig. 4 Dependence of the gain coefficient on the total beam power

## 4 结 论

研究了在无偏置正弦交流电场下掺  $C_{60}$  的向列液晶中记录的光栅的特性。在实验中观察到了具有稳定能量转移的二波耦合,证明在交流电场作用下液晶盒中记录的光栅为光折变光栅,并说明在交流电场下液晶中的空间电荷场仍然是直流的。利用二波耦合过程中的稳定的、非对称能量转移特性,在交流电场下实现了小信号的光学相干放大,这将使得液晶薄膜可以在交流电场下实现相干图像放大、新型滤波器、自抽运相位共轭、光限幅、神经网络和联想存储等应用。但是,相对于直流电场下的放大效应,交流电场

下液晶薄膜的光学敏感性较差,其需要较高的抽运能量,还有待进一步对其进行优化、改进。

### 参 考 文 献

- 1 Ostroverkhova O, Moerner W E. Organic photorefractives: mechanisms, materials, and applications [J]. *Chem. Rev.*, 2004, **104**(7): 3267~3314
- 2 Rudenko E V, Sukhov A V. Photoinduced electrical conductivity and photorefractive in a nematic liquid crystal [J]. *JETP Lett.*, 1994, **59**(2): 142~146
- 3 Rudenko E V, Sukhov A V. Optically induced spatial charge separation in a nematic and the resultant orientational nonlinearity [J]. *JETP*, 1994, **78**(6): 875~882
- 4 Khoo I C, Li H, Liang Y. Observation of orientational photorefractive effects in nematic liquid crystals [J]. *Opt. Lett.*, 1994, **19**(21): 1723~1725
- 5 Zhang Cuiyu, Huang Ziqiang. Characteristics analysis of binary optic liquid crystal blazed grating [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(7): 1231~1235  
张翠玉, 黄子强. 二元光学液晶闪耀光栅的特性分析 [J]. *光学学报*, 2008, **28**(7): 1231~1235
- 6 Dong Yufang, Li Haiyan, Xu Zeda. Phase gratings formed in photoinduced azo-polymer in liquid crystal [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(6): 1021~1025  
董毓芳, 李海燕, 徐则达. 光诱导液晶中偶氮聚合物形成相光栅的研究 [J]. *光学学报*, 2008, **28**(6): 1021~1025
- 7 Wiederrecht G P, Yoon B A, Wasielewski M R. High photorefractive gain in nematic liquid crystals doped with electron donor and acceptor molecules [J]. *Science*, 1995, **270**(5243): 1794~1797
- 8 Khoo I C, Slussarenko S, Guenther B D *et al.*. Optically induced space-charge fields, dc voltage, and extraordinarily large nonlinearity in dye-doped nematic liquid crystals [J]. *Opt. Lett.*, 1998, **23**(4): 253~255
- 9 Khoo I C, Ding J, Zhang Y *et al.*. Supra-nonlinear photorefractive response of single-walled carbon nanotube-and C60-doped nematic liquid crystal [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2003, **82**(21): 3587~3589
- 10 Zhang J, Ostroverkhov V, Singer K D *et al.*. Electrically controlled surface diffraction gratings in nematic liquid crystals [J]. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(6): 414~416
- 11 Petrossian A, Residori S. Surfactant enhanced reorientation in dye-doped nematic liquid crystals [J]. *Europhys. Lett.*, 2002, **60**: 79~85
- 12 Pagliusi P, Cipparrone G. Photorefractive effect due to a photoinduced surface-charge modulation in undoped liquid crystals [J]. *Phys. Rev. E*, 2004, **69**(6): 061708
- 13 Song L, Lee WK, Wang X. AC electric field assisted photo-induced high efficiency orientational diffractive grating in nematic liquid crystals [J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(6): 2197~2202
- 14 Lucchetti L, Gentili M, Simoni F. Colossal optical nonlinearity induced by a low frequency external electric field in dye-doped liquid crystals [J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(6): 2236~2241
- 15 Tero Kesti, Attilio Golemme. Photorefractive nematic liquid crystals with gain of constant sign under alternating voltage [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, **88**(1): 011917