

文章编号: 0253-2239(2007)06-1107-4

电控聚合物分散液晶变焦全息透镜制作*

郑继红 钟阳万 蔡明荣 庄松林

(上海理工大学光学与电子信息工程学院, 上海 200093)

摘要: 介绍了相位型全息聚合物分散液晶(PDLC)材料全息透镜,在电场作用下液晶微滴折射率逐渐与聚合物折射率匹配,实现透镜电控变焦。研究了微米尺寸和纳米尺寸液晶微滴聚合物分散液晶材料配方特性和微观结构。采用优化纳米尺寸材料配方制作 5~6 μm 聚合物分散液晶盒,采用离轴式平面波和球面波干涉全息写入光路,成功制作电控变焦聚合物分散液晶全息透镜样品。该透镜样品焦距为 20 mm,能够正一级衍射放大成像。实现“0”,“1”变焦的驱动电压阈值为 60 V。并进一步提出了基于聚合物分散液晶电控变焦元件集成叠加技术实现电控变焦光学成像系统的技术思路。

关键词: 全息; 电控变焦透镜; 聚合物分散液晶; 变焦成像系统

中图分类号: O438.1; TN26 文献标识码: A

Fabrication of Electrical-Controlled Polymer Dispersed Liquid Crystal Switchable-Focus Holographic Lens

Zheng Jihong Zhong Yangwan Cai Mingrong Zhuang Songlin

(College of Optics and Electron Information Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093)

Abstract: When ac voltage is applied, the refractive indexes of liquid crystal droplets and polymer binders match gradually, and the phase-type electrical-controlled switchable focus lens based on polymer dispersed liquid crystal (PDLC) material is switched on and off. In experiments, recipes and characteristics of micrometer size and nano-scale size polymer dispersed liquid crystal materials have been researched. The newly developed optimized nano-scale liquid crystal droplets polymer dispersed liquid crystal recipe is adopted to fabricate polymer dispersed liquid crystal cell samples with thickness of 5~6 μm . And in plane wave and spherical wave interference optical recording system, primary off-axis polymer dispersed liquid crystal focus-switchable holographic lens sample is developed with focal length of 20 mm. Amplified images with positive one-order diffraction are achieved and the driving voltage threshold for “0”, “1” transfer is about 60 V ac voltage. Furthermore, the conception of electrical-controlled focus-switchable optical image system based on polymer dispersed liquid crystal focus-switchable lens integration is put forward.

Key words: holography; electrical-controlled switchable focus lens; polymer dispersed liquid crystal; optical focus switchable imaging system

1 引言

新型的聚合物分散液晶(Polymer dispersed liquid crystal, PDLC)材料具有光学性质受电场调控的优点。液晶光轴的取向在电场作用下沿电场方向排列,使得聚合物分散液晶材料的折射率发生改变。基于这种电控折变性质,结合光科学全息技术诞生了电控体光栅(ESBG)技术^[1]。电控体光栅技术的光学全息元件衍射性质随电场作用发生变化,

因此在大面积光学显示、动态变焦光学成像系统,光通信器件及军事遥感等方面具有广泛应用前景^[2~4]。

随着二元光学和集成光学的发展,传统光学元件正朝着小型集成化和性能可调控的新型现代光学器件目标前进。目前成像系统中光学元件焦距的调控都采用机械运动的方式,系统体积比较大,调控速度比较慢。在实际应用中,需要的是质量轻、体积

* 上海市教委青年基金(Q40202)和上海市教委重点学科基金(T0501)资助课题。

作者简介: 郑继红(1975—),女,博士,讲师,主要从事信息光学、聚合物分散液晶器件等方面的研究。

E-mail: jihongzheng@sina.com

收稿日期: 2006-08-10; 收到修改稿日期: 2006-11-01

薄、快速变焦、易于集成的光学元器件,如摄像手机,需要不运动的微型变焦光学镜头。因此运用聚合物分散液晶材料制作全息的变焦透镜成为实现电控变焦光学成像的一条思路。

目前,世界上不少学者通过单纯液晶的电控折变性质,采用面型的改变或者电极形状的设计达到变焦的目的^[5],或者通过聚合物分散液晶掩模曝光制作菲涅耳波带片掩模板或者环行电极等方法实现变焦^[6]。这些方法对材料、玻璃基片的面型,电极制作等要求较高,制作工艺较复杂,衍射效率也较低。本文选择在纳米尺寸聚合物分散液晶材料基片上,利用平面波和球面波干涉全息的方法,成功制作了聚合物分散液晶电控变焦透镜的实验样品,并提出基于聚合物分散液晶材料的电控变焦光学成像系统的设计思路。

2 基本原理

用聚合物分散液晶液晶盒曝光,由同轴全息产生内疏外密的环形微观结构,而离轴全息产生肉眼不可分辨的弯曲条纹结构。在制作过程中,光致聚合相分离固化聚合物分散液晶材料的同时记录光学全息信息。在全息干涉的暗条纹(离轴透镜)或者暗环(同轴透镜)部分,液晶微滴聚集,而在亮条纹或者亮环部分,聚合物聚合固化结构。由于折射率差的存在,曝光结束后,形成了聚合物分散液晶相位型全息透镜。由于聚合物分散液晶材料本身的电控折变性质,在电场作用超过阈值时,液晶区域的有效折射率变为寻常折射率,聚合物为主的区域有效折射率不变,全息元件衍射效率降低,甚至消失,这样聚合物分散液晶全息透镜就实现相对于聚焦焦点的“0”,“1”式电控变焦。聚合物分散液晶全息电控透镜为平板式相位全息元件,图 1 为聚合物分散液晶透镜实现“0”,“1”变焦的示意图。

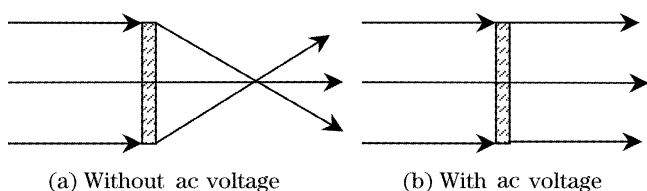


图 1 聚合物分散液晶全息透镜电控变焦示意图

Fig. 1 Switchable focus function of polymer dispersed liquid crystal holographic lens

3 聚合物分散液晶全息变焦透镜的制作

3.1 纳米尺寸聚合物分散液晶材料配方

传统的聚合物分散液晶配方采用对五赫醇五羟

基丙烯酸盐 (Dipentaerythrol hydroxy penta acrylate, DHPA) 和 E7 液晶以及光学添加剂等,在 514 nm 的激光曝光作用下产生微米尺寸的液晶微滴^[7]。由于散射严重,液晶表面在可见光波段透射率很低,该配方不适合制作变焦透镜。实验中,选用了高聚合度的 EB8301(预聚物),它具有更快的聚合速度,产生纳米尺寸的液晶微滴,TEB300 液晶(清华亚王液晶有限公司生产, $\Delta n = 0.168$, $n_e = 1.679$, $n_o = 1.511$ at 589 nm),该液晶粘滞系数相对较小,折射率差值较大,有利于形成折射率调控程度大的器件,同时需要的驱动电压较低。此外,针对光致相分离法需要添加光引导剂 Rose Mengal,协同引发剂 N-phenyl glycine (NPG) 和交联剂 N-vinyl pyrrolidone (NVP),并且额外添加少量 S-271,以降低器件的驱动电压。亚微米微滴尺寸的聚合物分散液晶并不散射入射光,反应时间快,但缺点是液晶微滴的再定向需要更大的驱动电压,通常在 15~20 V/ μm 。

图 2 是 600 \times 偏光显微镜下,微米尺寸和纳米尺寸液晶微滴微观结构比较,图 2(a)的 DHPA 与 E7 质量百分比为 35:65;图 2(b)、图 2(c)均以 EB8301 与 TEB300 质量百分比 1:1 配方,图 2(b)的交联剂占总质量的 0.1,图 2(c)的交联剂小于总质量的 0.02;图 2(d)为显微镜标尺,间距为 10 μm ;这些配方制作相等厚度的液晶盒,经曝光固化后

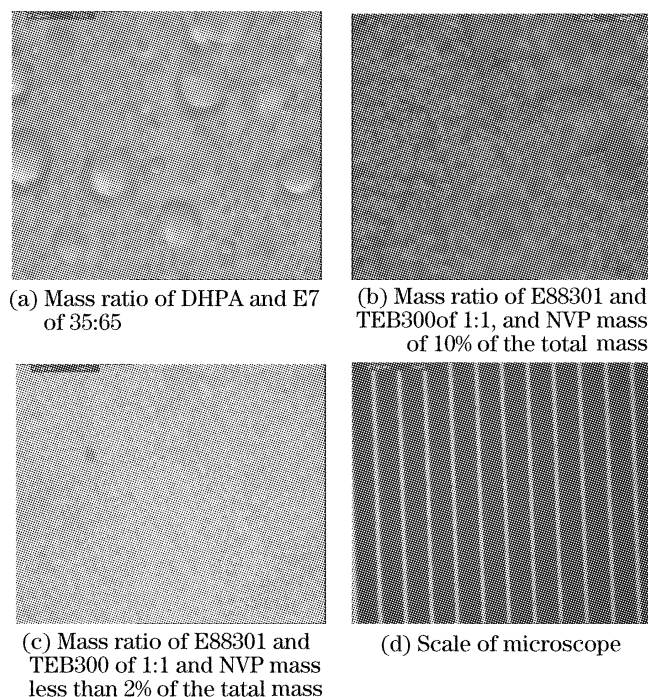


图 2 600 \times 偏光显微镜下的微米尺寸和纳米尺寸的液晶微滴

Fig. 2 Microsize and nanoscale liquid crystal droplet size under 600 \times polarized-light microscope

图 2(a) 表面散射严重, 可见光几乎不能通过, 图 2(b)、图 2(c) 可见光透射率较高。经过实验, 按照质量比 $m(\text{EB8301}) : m(\text{TEB300}) : m(\text{RB}) : m(\text{NPG}) : m(\text{NVP}) = 100 : 100 : 0.2 : 0.5 : 20$ 配方, 加热至液晶清亮点并将混合预聚物搅拌均匀, 并均匀涂布在 ITO(氧化铟锡) 导电玻璃片上, 控制厚度 $5 \sim 6 \mu\text{m}$, 制作待曝光液晶盒。

3.2 聚合物分散液晶电控变焦透镜的制作

全息透镜由一束平面波和一束球面波干涉, 或者由两束球面波干涉制作。聚合物分散液晶离轴全息透镜制作光路如图 3 所示, 514 nm 激光经过小孔滤波后成为平面波, 经过变倍扩束镜, 调节好曝光光斑尺寸, 再经分光棱镜成为两束平面波, 一路经过反射镜 M3, M5 传播到曝光面 C, 另外一路经过 M4 和消像差透镜 L1 传播到曝光面 C, 相当于从 A 点发出的发散球面波同平面波相干产生离轴全息信息记录于 C 处聚合物分散液晶盒内。如果在 C 位置加入另外一个分光棱镜, 那么平面波同球面波夹角很小, 在接收面上能够产生同心圆环形状的同轴全息图, 相当于菲涅耳波带板。全息透镜的焦距等于相当于发出球面波的点源 A 到曝光聚合物分散液晶盒的距离。全息透镜存在正负 1 级衍射, 即相当于一个正透镜, 又相当于一个负透镜。离轴全息透镜相当于棱镜和透镜的组合物。棱镜使光束偏转离轴, 透镜使物体成像。全息透镜的色散作用明显, 相位型同轴全息透镜的衍射效率理论极限为 41%, 而离轴全息透镜通常具有更高的衍射效率, 理论极限值为 1。

实验中, 液晶盒放置在图 3 所示的光路曝光面 C, 光源采用 514 nm 的风冷氩离子激光器, 为防止振动干扰, 放置于另一等高的光学平台。消色差透镜 L1 的孔径 $\phi = 30 \text{ mm}$, 焦距 $f = 50 \text{ mm}$ 。透镜 L1

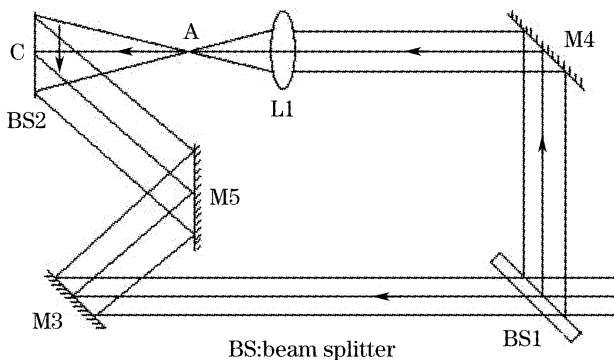


图 3 离轴电控全息变焦透镜的光路图

Fig. 3 Optical recording system of off-axis electrical-controlled focus-switchable polymer dispersed liquid crystal holographic lens

同曝光液晶盒 C 的距离为 70 mm 左右, 所制作的聚合物分散液晶透镜焦距为 20 mm 。曝光面的激光功率为 25 mW/cm^2 , 曝光时间为 $70'' \sim 80''$ 。

实验制作了三组离轴聚合物分散液晶透镜组, 分别对应于空间频率为 700 line/mm , 1000 line/mm 和 1500 line/mm 。三组均成功写入全息聚合物分散液晶电控透镜。用聚合物分散液晶全息透镜成像, 在衍射角度, 透过透镜可肉眼观察到放大的像, 同时也能够看到 0 级像。如果将透镜反转 180° 放置, 能观察到缩小的像和 0 级像。在三组实验中, 相当于 1500 line/mm 角度制作的全息透镜正一级衍射效率较高, 但是角度选择作用导致物体像很难捕捉。 700 line/mm 的全息透镜较容易找到成像位置, 但是衍射效率稍低。图 4 为所制作的相当于空间频率 1000 line/mm 的全息透镜, 采用波长 633 nm 的半导体激光, 用数码相机拍摄, A 为正 1 级衍射像, B 为 0 级像。正一级衍射放大像, 效果上相当于凸透镜成像。在 50 Hz 交流电压 $60 \sim 65 \text{ V}$ 时, 可观察到放大衍射像消失, 其电控“0”, “1”调焦的变化阈值在 $12 \text{ V}/\mu\text{m}$ 。图 5(a) 为 $600 \times$ 偏光显微镜拍摄的离轴全息聚合物分散液晶透镜微观结构图, 图 5(b) 为作为对比的显微标尺, 间距为 $10 \mu\text{m}$ 。

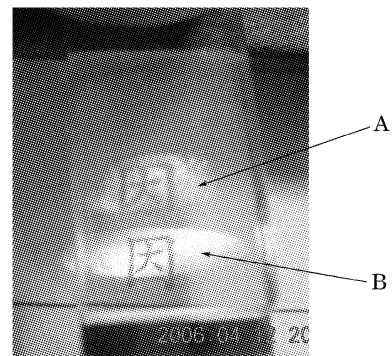


图 4 聚合物分散液晶全息透镜的一级衍射放大成像 (A 为一级衍射放大像, B 为 0 级像)

Fig. 4 First-order diffraction magnified image of polymer dispersed liquid crystal holographic lens. (A stands for the first-order diffractive image, B stands for zero-order image)

所制作的离轴全息聚合物分散液晶透镜衍射效率不够高, 分析其原因, 主要有: 光源采用风冷 514 nm 的 Ar 离子激光器, 振动噪音可能干扰全息元件干涉条纹分布, 影响衍射效率; 聚合物分散液晶材料在制作液晶盒过程中, 不能严格保证两片 ITO 导电玻璃之间的曝光层厚度均匀性; 在曝光过程曝光相分离时间的控制、光路调节因素等, 都影响衍射效率。

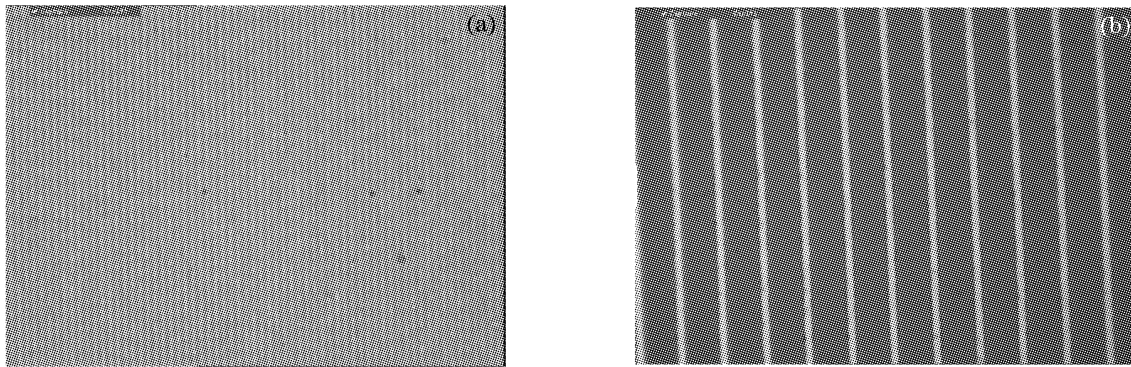


图 5 600×显微镜下的微观结构图(a)和10 μm显微标尺(b)

Fig. 5 Microstructure observed by 600× polarization microscope (a) and 10 μm scale of microscope (b)

4 N 个离散焦点的电控光学成像系统初步设计^[8]

基于聚合物分散液晶电控材料的单片衍射元件能够实现焦点位置处的“0”，“1”变焦。如果设计不同的全息记录光路，就可制作具有不同焦距的电控调焦全息透镜，这些单个电控透镜都具有“0”和“1”的

聚焦和不聚焦的状态。如果用 N 个焦距参量不同的聚合物分散液晶电控透镜叠加，调节电场调控的次序，成像系统可以得到 2^N 个焦点。设计集成的电场调控系统，通过对单片变焦透镜调控的组合和次序可以实现光学系统离散变焦功能。实现方法的示意图如图 6。

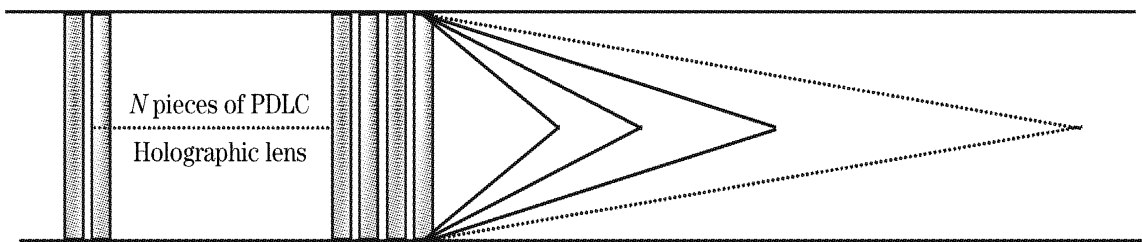


图 6 N 组聚合物分散液晶变焦透镜组合能实现 2^N 个电控焦点

Fig. 6 Cascading N groups of focus-switchable polymer dispersed liquid crystal lens to get 2^N potential focus

5 结 论

实验初步制作了全息电控聚合物分散液晶变焦透镜，焦距为 20 mm，驱动电压阈值 60 V。聚合物分散液晶全息变焦透镜的初步探索证明了该方案有真正实现电控变焦成像系统的可能性，但在实际运用中需要提高衍射效率，降低驱动电压。由于聚合物分散液晶全息透镜像差大，它的发展方向为小型集成的单色变焦系统，可配合设计的固态消像差成像系统，采用近轴光照明，实现变焦成像。

参 考 文 献

- 1 L. Domash, G. Crawford, A. Ashmead *et al.*. Holographic PDLC for photonic applications[C]. *Proc. SPIE*, 2000, **4107**: 46~58
 - 2 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*, 2005, **33**(8): 1087~1091 (in Chinese)
- 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*, 2005, **33**(8): 1087~1091

- 3 Jun Qi, Gregory P. Crawford. Holographically formed polymer dispersed liquid crystal displays[J]. *Displays*, 2004, **25**: 177~186
 - 4 H. Ramanitra, P. Chanclou, L. Dupont *et al.*. Polymer-dispersed liquid crystal structure for variable optical attenuator application[J]. *Opt. Engng.*, 2004, **43**(6): 1445~1453
 - 5 Hongwen Ren, Janet R. Wu, Yun-Hsing Fan *et al.*. Hermaphroditic liquid-crystal microlens[J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(4): 376~378
 - 6 Hongwen Ren, Yun-Hsing Fan, Shin-Tson Wu. Tunable Fresnel lens using nanoscale polymer-dispersed liquid crystals[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2003, **83**(8): 1515~1517
 - 7 Richard L. Surtherland, Lalgudi V. Natarajan, Vincent P. Tondiglia. Switchable holograms in new photopolymer-liquid crystal composite materials[C]. *Proc. SPIE*, 1995, **2404**: 132~141
 - 8 Zheng Jihong, Zhuang Songlin, Su Jinwen *et al.*. A electrical-controlled switchable focus optical imaging system [P]. 200510025499. 2, 2005-11-30
- 郑继红, 庄松林, 苏锦文 等. 一种电控变焦光学成像系统制作方法[P]. 200510025499. 2, 2005-11-30