

电控聚合物分散液晶全息透镜及特性研究^{*}

郑继红^{1)†} 钟阳万²⁾ 温 垦¹⁾ 骆鑫盛¹⁾ 庄松林¹⁾

1) (上海理工大学上海市现代光学重点实验室, 上海 200093)

2) (江西理工大学信息工程学院, 赣州 341000)

(2009 年 5 月 12 日收到; 2009 年 6 月 10 日收到修改稿)

报道位相型电控聚合物分散液晶(H-PDLC)全息衍射透镜的研制及特性研究,理论上,根据耦合波理论,研究了不同的相分离程度系数下,理想位相型电控聚合物分散液晶(H-PDLC)全息衍射透镜在可见光波长(400—800 nm)的衍射特性.实验研制了衍射效率最高为 70% 的电控 H-PDLC 变焦透镜样品,研究表明 H-PDLC 透镜具有优良的成像特性,和快速响应的电控开关特性,在光学成像系统,光通信系统中具有良好的应用前景.

关键词: 聚合物分散液晶, 变焦透镜, 相分离结构系数, 成像特性

PACC: 4270D, 4240E

1. 引 言

全息聚合物分散液晶(holographic polymer dispersed liquid crystal, H-PDLC)材料是一种新型的光电信息功能材料,在电场调控下材料的有效折射率发生变化.1993 年 Sutherland 等人提出并开始了相关研究^[1],近年来受到广泛关注.光学全息术与 PDLC 材料的结合诞生了电控布拉格光栅技术(ESBG)^[2-4],不仅能够实现衍射效率的电场调控,而且具有独特的优良性能,如体积小、质量轻、易于小型集成、响应时间快、衍射效率高特点^[5].这些特点使得它在光通讯(包括光开关、光衰减器、均衡器等)、集成光学、平板显示、信息存储等领域有着广阔的应用前景^[6-10].当前,随着信息技术、集成光学、二元光学和自适应光学的发展,人们对光学变焦透镜无机械运动部件、小型可集成化和可快速变焦等性能的要求日益迫切,因此研究基于 H-PDLC 电控变焦透镜具有一定的科学意义和潜在的应用价值.

目前国外学者报道的实现聚合物分散液晶变焦透镜的方法和形式多种多样,有折射型,衍射型和折衍混合型;有通过电控调焦的,也有通过光的偏振方向来实现调焦^[11];如 Liu, Ren 等利用 PDLC

或者纯液晶和其他无电控折变性质的材料制作双胶合透镜,当给透镜施加电压时,液晶有效折射率发生改变,透镜的焦距也随之改变^[12-16];或者将特殊结构的电极产生中心对称的、沿径向方向渐变的非均匀电场施加到 PDLC 或者纯液晶材料(液晶盒)上来制作变焦透镜,通过调节电场来达到变焦的目的^[17,18];还有报道用掩模办法将透镜阵列做到聚合物分散液晶材料上,模拟类似于苍蝇的复眼功能^[19].无疑,在多种方法中,用全息技术研究 H-PDLC 变焦透镜是最基本的方法之一.

一个理想的位相型 H-PDLC 全息透镜在没有电场作用时具有一个固定的焦点,在电场作用下,就如同玻璃平板一样,实现电场调控下的“0”,“1”变焦.当 N 个不同焦点位置 H-PDLC 全息透镜叠加可以实现 2^N 个焦点状态^[7].当这些焦点位置相邻很近时,则可近似于实现光学系统的连续变焦.在实际的 H-PDLC 全息透镜研制中,由于 PDLC 材料形成过程中的相分离微观结构不够完全,以及其他如吸收,散射因素的影响,衍射效率很难做到 1.本文在理论上考虑 H-PDLC 相分离程度系数的影响,利用耦合波理论模拟计算了 H-PDLC 透镜在可见光波段的衍射效率.实验上研制了最高 70% 衍射效率 H-PDLC 变焦透镜,并研究了 H-PDLC 透镜的成像,电控,及响应时间等特性.

^{*} 国家自然科学基金青年基金项目(批准号:60801041)上海市科委国际合作项目(批准号:08530707400),上海市教委一般项目(批准号:09YJ227)以及上海市重点实验室,重点学科建设项目(批准号:08DZ2272800, S30502)资助的课题.

[†] E-mail: jhongzheng2002@yahoo.com.cn

2. 聚合物分散液晶全息透镜衍射效率理论模拟计算

用全息干涉技术制成的透镜称为全息透镜,全息透镜实际上记录的是点源的全息图.全息透镜主要分为同轴和离轴两种记录方式,由于同轴全息透镜能产生一系列的聚焦点,对成像质量产生影响,因此通常使用离轴全息记录方式制作全息透镜.离轴全息透镜可以同时具备透镜和棱镜的功能,既能对物体成像,又能使光轴发生偏转.高质量的全息透镜具有很大的应用市场,如全息头盔显示,光通信以及条形码扫描系统等^[20]. H-PDLC 液晶盒在明暗相间的相干条纹曝光作用后,发生两相分离,亮条纹位置预聚物交联聚合,暗条纹位置液晶微滴聚集.全息透镜在条纹中曝光后得到的微观结构分布和记录场的结构分布相似,同轴为内疏外密的同心圆环,而离轴则为曲率半径很大的圆弧的一部分,可近似考虑成光栅条纹. H-PDLC 电控全息器件的衍射特性与很多因素有关,如相分离程度,液晶含量,交联速度,曝光强度, H-PDLC 器件的衍射性能优化比较复杂,可以从微观动力学角度和宏观实验现象分析和优化^[21-24].

目前,基于纳米 H-PDLC 材料的电光器件,由于液晶微滴尺寸在纳米量级,对可见光和红外光的吸收和散射不明显,依靠电场调控折射率调制深度改变衍射效率,因此将 H-PDLC 全息透镜近似成不依赖偏振,无吸收和散射的理想纯位相光栅,拟采用 Kogelnik 耦合波理论分析其衍射效率^[25],结合 H-PDLC 相分离的特点,考虑液晶含量和相分离程度系数,这两个影响衍射效率的主要因素,分析模拟透镜在可见光波段衍射效率特性.首先根据参量 Q 判断全息透镜是否满足体全息条件^[25]:

$$Q = \frac{2\pi\lambda\delta}{n\Lambda^2}, \quad (1)$$

λ 为光波长, δ 为记录介质厚度, n 为折射率, Λ 为全息条纹间距. 当 $Q \gg 1$ 时, 透镜为体全息, 工作在布拉格衍射区域; 通常, 实验中, 工作在可见光波段的 H-PDLC 透镜, δ 大于 $3 \mu\text{m}$, 光栅常数 Λ 为 $0.2-1.67 \mu\text{m}$ 之间, $n = 1.5$, λ 取 $0.514 \mu\text{m}$, 可得 $Q \gg 1$.

对于 H-PDLC 体全息透镜(离轴), 微观几何结构近似看成全息光栅类似的等间距条纹, 如图 1 所示, 全息记录介质表面垂直于 XZ 平面, δ 是记录介

质的厚度; Λ 表示全息条纹间距, \mathbf{K}_F 表示光栅的传播矢量, 其方向垂直于峰值强度面, 为 $\mathbf{K}_F = \frac{2\pi}{\Lambda}$; θ 是入射光与光栅表面的夹角, ϕ 是光栅条纹法向同 Z 轴的夹角. 对于体全息, 只有当入射光满足布拉格条件 $2\Lambda\sin\theta_0 = \lambda_D$ 时才能产生加强的衍射光, 其中 θ_0 是布拉格入射角, λ 为真空中波长, λ_D 为在介质中入射光的波长. 在线性记录条件下, 由于曝光使得记录介质的折射率和吸收系数按余弦规律变化, 则体全息透镜中记录介质的折射率 n 分布表示为

$$n = n_0 + n_1 \cos(\mathbf{K}_F \cdot \mathbf{r}), \quad (2)$$

n_0 是基质的折射率, n_1 是折射率调制深度. 因此, 在布拉格衍射条件满足情况下, 非倾斜透射式全息透镜的衍射效率的表达式可近似为

$$\eta = \left[\sin\left(\nu \sqrt{1 + \left(\frac{\xi}{\nu}\right)^2}\right)\right]^2 / \left[1 + \left(\frac{\xi}{\nu}\right)^2\right], \quad (3)$$

其中

$$\nu = \pi n_1 \delta / \lambda (C_R C_S)^{1/2}, \quad (4)$$

$$\xi = \Delta\lambda K_F^2 \delta / 8\pi n C_S = \Delta\theta K_F \delta \sin(\theta_0 - \phi) / 2C_S, \quad (5)$$

$$C_R = \cos\theta, \quad (6)$$

$$C_S = \cos\theta - \frac{K_F}{\beta} \cos\phi, \quad (7)$$

$$\Delta\theta = \theta - \theta_0, \quad \Delta\lambda = \lambda - \lambda_0, \quad (8)$$

$$\beta = 2\pi n / \lambda. \quad (9)$$

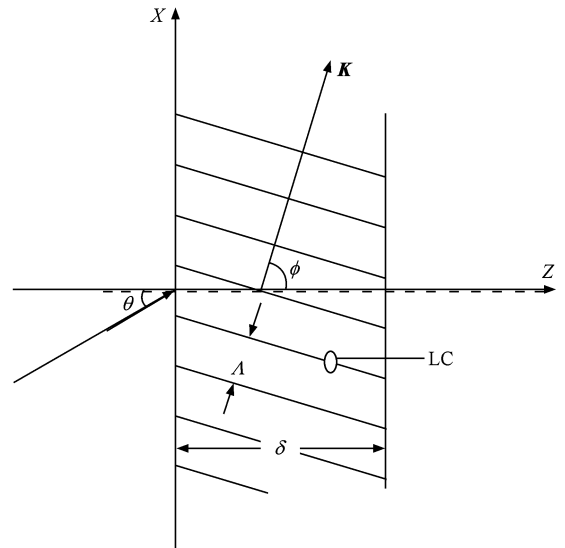


图 1 H-PDLC 体全息透镜(离轴)几何结构图

对于 H-PDLC 全息透镜, 大量的液晶从预聚混合物中析出, 并在暗条纹带聚集成微滴. 液晶是双

折射物质, 寻常折射率是 n_o , 异常折射率为 n_e ; 液晶微滴的指向矢是随机分布, 如果将暗条纹带近似成析出的纯液晶, 则暗条纹带的平均折射率可表示为

$$\bar{n}_{lc} \approx \left[\frac{1}{3} (n_e^2 + 2n_o^2) \right]^{1/2}. \quad (10)$$

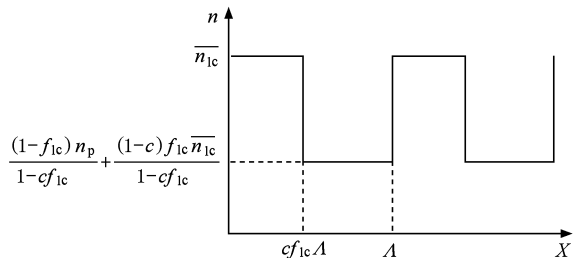


图2 H-PDLC 全息透镜折射率分布近似图

$$n = \begin{cases} \bar{n}_{lc}, & (m\Lambda \leq x \leq m\Lambda + cf_{lc}A), \\ \frac{(1-f_{lc})n_p}{1-cf_{lc}} + \frac{(1-c)f_{lc}\bar{n}_{lc}}{1-cf_{lc}}, & (m\Lambda + cf_{lc}A \leq x \leq (m+1)\Lambda), \end{cases} \quad m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (11)$$

由于理想干涉条纹的光强分布和 H-PDLC 理想位相光栅的折射率分布都近似于余弦分布, 将上述折射率分布矩形函数用傅里叶展开为余弦形式为

$$n \approx f_{lc}\bar{n}_{lc} + (1-f_{lc})n_p + \left[\frac{2(1-f_{lc})(\bar{n}_{lc} - n_p)}{\pi(1-cf_{lc})} \sin(\pi cf_{lc}) \right] \cos(\phi). \quad (12)$$

和(2)式比较, 可以得到

$$n_0 \approx f_{lc}\bar{n}_{lc} + (1-f_{lc})n_p, \quad (13)$$

$$n_1 = \frac{2(1-f_{lc})(\bar{n}_{lc} - n_p)}{\pi(1-cf_{lc})} \sin(\pi cf_{lc}). \quad (14)$$

将方程联立, 可以近似模拟透射 H-PDLC 全息衍射元件的衍射效率以及诸如厚度, 相分离程度, 液晶含量, 空间频率等因素对元件衍射效率的影响; 实验中使用的 TEB300 液晶, $n_e = 1.679$, $n_o = 1.511$, 设全息透镜空间频率为 600 lines/mm, 即 $\Lambda = \frac{1}{f} = 1.67 \mu\text{m}$, 实验中选用的聚合物单体的折射率通常很难同液晶完全匹配, 如 EB8301, 经测量折射率约为 1.49@589 nm, 但是在复杂的化学混合体系中, 交联剂, 活性剂等其他成分都会对折射率产生较大影响, 帮助有效折射率的匹配. 因此, 在计算中取理想情况下聚合物的折射率 n_p 和液晶的寻常折射率

假设预聚物中液晶所占的比重为 f_{lc} , 聚合物单体, 交联剂, 少量的光引发剂, 活性剂等其余的物质全部近似成聚合物单体, 含量为 $1-f_{lc}$. 全息聚合物分散液晶相分离的程度为 c (定义 c 为未发生相分离析出的液晶与总的液晶含量的比, 取值在 0 到 1 之间, 当聚合相分离完全时, $c=1$), 沿光栅条纹 X 方向上, $cf_{lc}A$ 的区域内为相分离的液晶微滴, 有效折射率为 \bar{n}_{lc} , 其余则为聚合物与液晶微滴的混合物, 有效折射率为 $\frac{(1-f_{lc})n_p}{1-cf_{lc}} + \frac{(1-c)f_{lc}\bar{n}_{lc}}{1-cf_{lc}}$, 其中 n_p 为聚合物的折射率; 则 H-PDLC 全息透镜的折射率分布在 X 方向可近似成如图 2 所示的矩形函数:

相等. 设预聚混合物中液晶所占的比重为 $f_{lc} = 0.35$. 图 3 模拟了理想位相型 H-PDLC 全息透镜在不同相分离程度 c 系数情况下, 光栅在以 633 nm 为中心布拉格波长, 在可见光 (400—800 nm) 的范围的衍射特性曲线. 从图 3 可以得知, 随着液晶微滴析出比例的增大, 也就是相分离程度的提高, 器件的衍射效率总体呈现上升的趋势, 在可见光范围内带宽增大, 衍射旁瓣峰值也相应增加. 同时, 也可以看出, 在 $c=0.5$ 的时候, 在正一级衍射线的中间对应 0.65 μm 位置出现了凹陷, 这种衍射效率随波长的变化反应了 H-PDLC 衍射器件的特性. 图 4 模拟了以 633 nm 为中心波长, 入射角为布拉格角 10.94° 入射时, 不同厚度的体光栅, 相分离程度同衍射效率的关系. 图 4 说明了在确定的液晶盒厚度时, 随着相分离程度的提高, 衍射效率几乎呈现线性升高直至饱和值 1. 随着液晶盒厚度的增加, 全息器件的衍射效率更高, 这点符合厚体光栅的特性. 总之, 相分离程度对于衍射效率产生重要的影响, 相分离程度高能形成更规则的微观结构, 也能促进衍射效率的提高, 理想 H-PDLC 透镜能在宽光谱范围内实现高衍射效率.

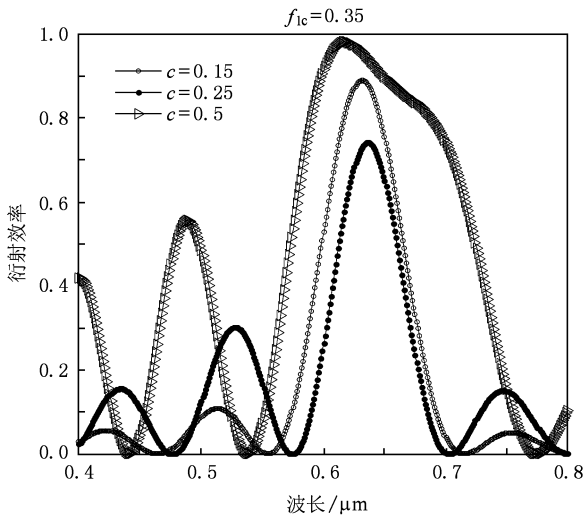


图3 相分离程度系数 c 为 0.15, 0.25 和 0.5 时的 H-PDLC 透镜在可见光波段的波长选择性模拟

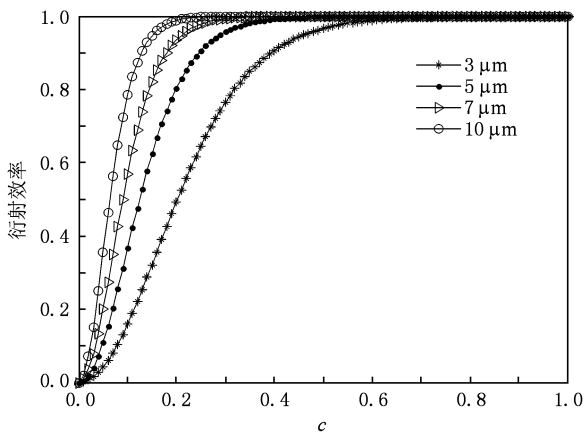


图4 满足布拉格衍射条件时相分离程度同衍射效率关系图 (633 nm, 600 lines/mm, 理想情况下)

3. 电控全息透镜的研制及特性研究

3.1. H-PDLC 透镜的实验制作

H-PDLC 全息器件的材料配方对相分离微观结构产生重要的影响, Liu 等人研究了在常规的 PDLC 配方中添加一定量的各种表面活性剂, 对降低 H-PDLC 的驱动电压, 改善微观结构产生较大的影响^[26]. 本实验中, PDLC 材料配方包括预聚物 EB8301 (UCB 公司生产), TEB300 向列液晶 (北京清华亚王液晶有限公司生产 $n_o = 1.511$, $n_e = 1.679$ @ 589 nm), 光引发剂选用 Rose Mengal (RB), 协同

引发剂选用 N-phenylglycine (NPG), 交联剂选用 N-vinyl pyrrolidone (NVP), 这三种化学药品都是美国 Aldrich 公司生产; 并额外添加降低驱动电压的表面活性材料 S-271, 美国 ChemService 公司提供. 这些化学成分按照质量配比为 EB8301 39.9%, 液晶 39.77%, RB0.1%, NPG0.23%, NVP 8% 和 S-271 12% 的比例在暗室里混合并均匀配制, 并加热到液晶清亮点温度 (62°C), 避光冷藏保存. 将预聚混合物滴在镀有 ITO 导电膜的玻璃基片上, 控制厚度为 5—10 μm . 离轴 H-PDLC 透镜的制作光路选用平面波和球面波离轴干涉光路, 如图 5 所示, 514 nm 的 Ar^+ 激光器 S 输出 50 mW 的激光, 经过光衰减片 A 调整光强, 再经过小孔滤波器和扩束准直系统 E 后成为高斯光强分布平行光, 用非偏振分光棱镜 NPBS 将平行光分成两束, 一束经平面反射镜 M_2 反射后到达曝光面, 另一束经平面反射镜 M_1 后再经过一透镜 L ($\phi = 30 \text{ mm}$, $f = 50 \text{ mm}$) 会聚后又发散至曝光面, 形成半径 $R = 9 \text{ mm}$ 的曝光光斑, 两曝光光束光轴夹角 θ 为 16° — 20° , 其角平分线方向垂直于 H-PDLC 液晶盒表面, 曝光面强度为 15—20 mW/cm^2 , 曝光时间为 60"—120" 之间. 制作的 H-PDLC 调焦透镜的空间频率控制在 580 lines/mm 至 1000 lines/mm 之间. 同轴 H-PDLC 透镜的制作光路则是在马赫-增德干涉光路的一臂加入透镜, 经过棱镜合光后记录在液晶盒中. 曝光时间和强度同离轴透镜相同.

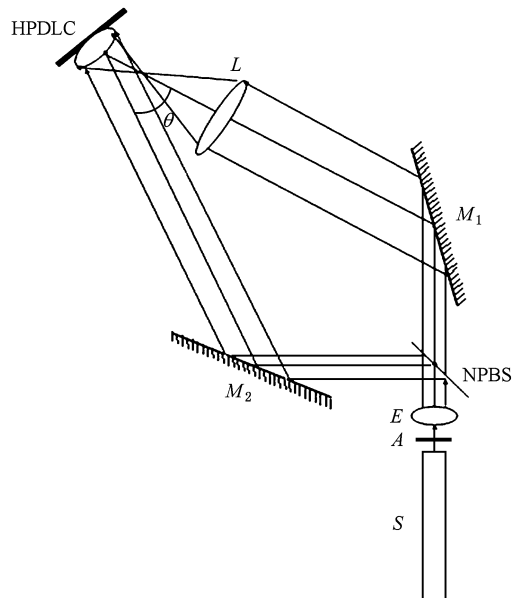


图5 H-PDLC 电控透镜的制作光路图

3.2. H-PDLC 透镜样品的衍射及成像特性

H-PDLC 全息透镜的衍射效率与研制过程中的多个因素和工艺有关,如材料配方,曝光时间,液晶盒厚度,光路空间频率,曝光光强,再现光波长等. H-PDLC 透镜在 514 nm 激光波段制作,在 633 nm 波段测量衍射效率. 测量光路如图 6 所示,He-Ne 激光以布拉格角入射 H-PDLC 全息透镜,正一级衍射球面波先会聚后发散,将探测器探头放置在合适位置,使得衍射光斑能量全部进入探测器. 同时测量透射光能量和入射光能量. 衍射效率计算公式等于衍射光能量除以入射光能量,在忽略散射和吸收损耗前提下近似等于衍射光能量除以衍射能量和透射能量的总和. 目前实验中检测的衍射效率通常多集中在 30%—70% 之间,样品盒上不同入射点测量的衍射效率有些差异. 分析原因,一是由于液晶盒厚在研究制作过程中很难做到完全均匀等厚,重复实验中液晶盒的厚度稍有差异;二是曝光光路中的光斑能量呈现高斯分布,边缘能量比中心能量低;种种原因导致了液晶盒内部的聚合物分散液晶微观结构相分离结构程度不够完全,条纹边缘对比度不高. 图 7 是 H-PDLC 全息透镜在 600 倍偏光显微镜下的微观结构图. 离轴全息透镜的空间频率在 700 lines/mm,放大后可见亮暗条纹的边缘不平整,还有少许的 RB 材料和 NPG 等材料没有反应完全.

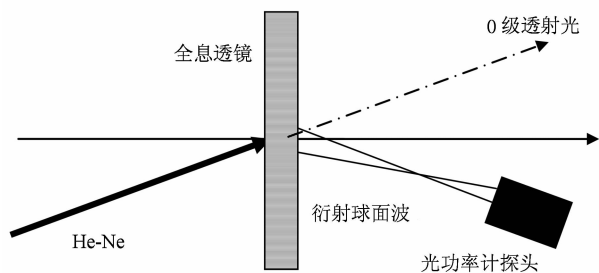


图 6 H-PDLC 全息透镜衍射效率测量光路

H-PDLC 全息透镜相当于集中了放大透镜,缩小透镜,和折光棱镜等多个光学元件为一体. 优点在于平板表面,可制作大孔径,易于集成,可实现电场开关调控等. 图 8(a) 为同轴透镜对字母“A”所成像,放大,缩小和“0”级等大的像位于同一张照片内,不容易分开,且衍射效率较低. 图 8(b) 为离轴 H-PDLC 透镜对字母“NUM”所成的放大虚像,由于拍摄时透镜离物体的距离很近,因此放大效果看上去不明显. 图 8(c) 是离轴 H-PDLC 透镜对标尺成的

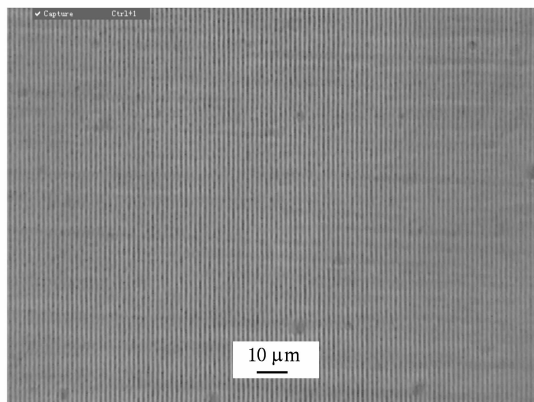


图 7 H-PDLC 全息透镜在 600 倍偏光显微镜下的微观结构图

实像图,出现“246”三个倒立的数字图. 其拍摄光路如图 9 所示. 采用对称光路记录得到的 H-PDLC 透镜 633nm 波长的布拉格角为 10.5° ,将入射激光与 H-PDLC 透镜表面法线方向成十度左右的偏角入射,通过毛玻璃散射后照到标尺上,照亮标尺上的数字“246”,在透射光一侧用屏接收衍射实像,当转动转台将 H-PDLC 光栅至某一特定角度时会发现屏上接收到的实像最清晰明亮,说明该角度满足布拉格衍射条件. 此时,在衍射方向上成像位置处用 CCD 接收清晰的实像. 实验时物距 $u = 80$ mm,像距 $v = 125$ mm,根据 $\frac{1}{u} + \frac{1}{v} = \frac{1}{f}$,可以计算该透镜焦距在 633 nm 时为 48.8 mm. 衍射全息透镜的焦距表达式为和横向放大率公式分别为^[20]

$$\frac{1}{f_h} = \pm \frac{\mu}{m^2} \left(\frac{1}{R_o} - \frac{1}{R_R} \right), \quad (15)$$

$$M_x = M_y = [1 \pm (\lambda_c / \lambda_o) (R_R^{-1} - R_o^{-1}) R_c]^{-1}, \quad (16)$$

其中 $\mu = \lambda_c / \lambda_o$ 是波长变化因子, λ_o 为记录波长, λ_c 为再现波长, m 是乳胶或液晶盒厚度变化因子, R_o 表示出射点源到曝光面的距离; R_R 是参考光束的中心距离, R_c 是再现成像时物体与 H-PDLC 透镜之间的距离. 采用平面波和发散球面波制作的 H-PDLC 全息透镜,焦点与曝光面之间的距离 $R_o = 60$ mm,可以计算在 633 nm 焦距为 ± 48.7 mm. 当物距为 80 mm 时,横向放大率 $M_x = M_y = -1.56$ 和 0.38,实验测量的倒立放大的标尺实像“246”,其放大倍率为 $M = -\frac{v}{u} = -1.5625$,与计算结果符合. 该 H-PDLC 全息透镜孔径直径为 $D = 18$ mm,相对孔径为 $\frac{D}{f} = 0.37$,该透镜在 633 nm 波长的分辨率

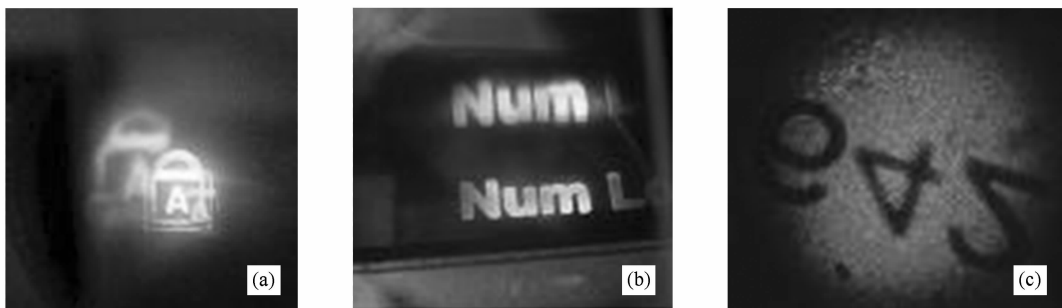


图 8 H-PDLC 电控透镜的成像图 (a)为同轴透镜成像; (b)为离轴透镜对物体成放大的虚像; (c) CCD 接收的 H-PDLC 透镜对物体(标尺)成的实像

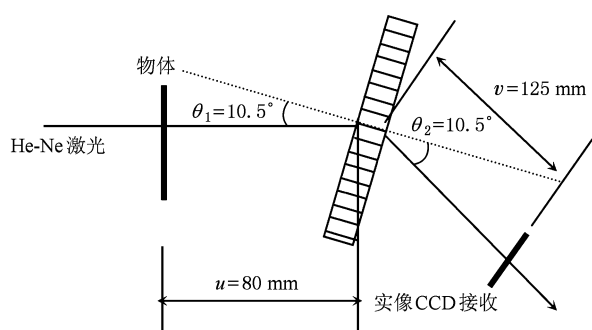


图 9 633 nm CCD 接收 H-PDLC 透镜实像成像光路

$$\text{为 } 0.61 \frac{\lambda}{N. A.} \approx 1 \mu\text{m}.$$

3.3. H-PDLC 变焦透镜的电控开关特性

H-PDLC 全息器件的电控开关特性与器件的液晶盒厚度,以及材料配方有很大的关系^[6]. 根据 Wu 和 Erdmann 等人的理论,聚合物分散液晶材料的驱动阈值电压为^[27]

$$V_{\text{th}} = \frac{\delta}{3r} \left(\frac{\sigma_{\text{lc}}}{\sigma_{\text{p}}} + 2 \right) \left[\frac{\kappa(l^2 - 1)}{\Delta\epsilon} \right]^{1/2}, \quad (17)$$

其中 σ_{lc} 和 σ_{p} 分别是液晶和聚合物的电导率, r 是液晶长轴, l 是液晶微滴的长轴与短轴的比值, $\Delta\epsilon$ 表示液晶的介电各向异性常数, δ 是指聚合物分散液晶全息透镜的厚度, κ 是液晶的弹性系数. 因此阈值电压通常与液晶微滴尺寸成反比,而与液晶盒厚度成正比. 通常 PDLC 微滴尺寸在 $5 \mu\text{m}$ 左右, 阈值电压在 $0.25 \text{ V}/\mu\text{m}$, 而纳米尺寸的 H-PDLC 液晶阈值电压在 $25 \text{ V}/\mu\text{m}$, 由于在实验配方中加入了适量的活性剂 S-271 成分, 使得驱动电压和阈值都大大降低^[27]. 实验中的 H-PDLC 全息透镜厚度为 $5\text{—}10 \mu\text{m}$, 阈值作用电压通常为 30 V 到 35 V , 施加 80 V 至 100 V 交流电压时, 衍射强度可以被调控到原来

$5\% \text{—}10\%$ 能量, 对应衍射效率从 70% 左右降低到 $3.5\% \text{—}7\%$, 再增大电压也无法将衍射能量降低到零, 反而会容易击穿液晶盒. 图 10 电控开关拍摄效果明显的样品在无电压驱动和在 100 V 电压驱动下的衍射发散球面波的“开”“关”状态. 由于数码相机感光的原因, 看上去 0 级光比正一级衍射光亮度高, 实际正一级衍射光能量稍强于零级透射光. 图 11 是实验测量的衍射能量在电场控制下的能量变化图, 与文献[23]所研究的电光特性曲线相似. 分析电场作用时, 从 30 V 到 70 V 之间存在线性工作区域, 衍射能量几乎与施加电压成线性反比关系, 另外, 由于折射率不能完全匹配造成在电压作用下衍射光不能完全擦除.

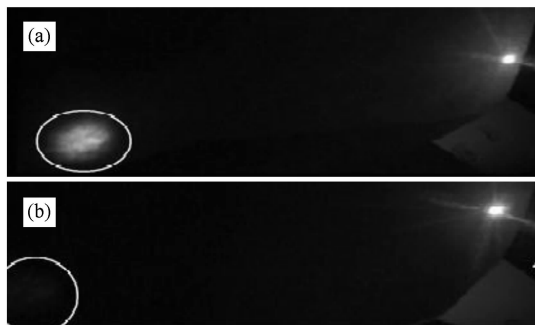


图 10 H-PDLC 全息透镜的电控开关特性 (a)为衍射的球面发散波(划白线圈部分), 其中右边亮点为零级透射光; (b)为 $E = 100 \text{ V}$ 时白线圈内发散球面波能量接近为 0, 零级透射光能量明显增强

3.4. H-PDLC 变焦透镜的时间响应特性

评价电控聚合物分散液晶全息透镜特性参数之一是响应时间. H-PDLC 材料透镜开关响应时间测量通常小于 10 ms , 甚至到几十微秒, 而常用的液晶空间光调制器 SLM 的反应时间都大于 10 ms . 这

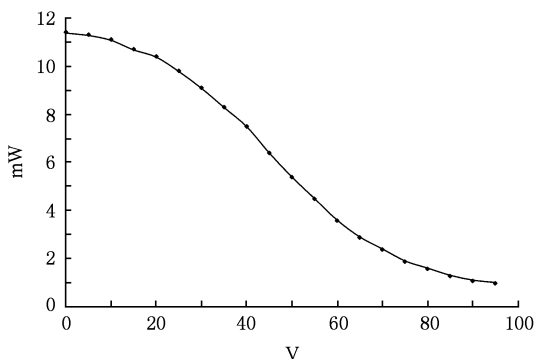


图 11 H-PDLC 全息透镜的电控衍射能量变化图

也是 H-PDLC 全息透镜器件优于其他液晶器件的原因之一。理论上计算响应时间的公式为^[28]

$$\tau_{\text{on}} = \frac{\chi}{\Delta \varepsilon E^2}, \quad (18)$$

$$E = \frac{3 \bar{\varepsilon}_{\text{lc}} V}{(2 \bar{\varepsilon}_{\text{lc}} + \varepsilon_{\text{p}}) \delta}, \quad (19)$$

$$\tau_{\text{off}} = \frac{\chi r^2}{\kappa (l^2 - 1)}, \quad (20)$$

其中 χ 表示液晶的黏度系数, r 是液晶微滴的半径, l 是液晶微滴的长轴与短轴比, κ 是液晶的弹性系数, $\bar{\varepsilon}_{\text{lc}}$ 是随机排列液晶微滴的介电常数, ε_{p} 是聚合物的介电常数, V 是加在聚合物分散液晶全息透镜上的电压, δ 代表全息透镜的厚度。公式表明, 下降时间 τ_{off} 与给聚合物分散液晶全息透镜所加的电压无关, 只与液晶黏度系数和弹性系数、微滴半径有关, 下降时间 τ_{off} 与液晶的黏度系数 χ 及液晶微滴的半径 r 的平方成正比, 与液晶弹性系数 κ 成反比; 而上升时间 τ_{on} 与加在全息透镜上的电压的平方成反比, 与黏度系数成正比, 所以就响应时间来说, 选用液晶的黏度系数小, 弹性系数要比较大, 介电常数要大, 但介电各向异性也要大, 相分离结构形成后液晶微滴小, 才有助与提高响应速度, 降低开关时间。在 H-PDLC 电控透镜实验中, 由于制作过程的不同, 样品的衍射效率, 响应时间, 电控特性之间存在个体差异。在样品厚度较薄 (小于 $5 \mu\text{m}$) 形成的液晶微滴尺寸较小, 宏观透明程度高的样品响应时间较快。反

之则较慢。较典型的实验结果是, 用 50 Hz 100 V 电压作用下, 全息透镜衍射光经过光探测器, 然后输入示波器, 得到如图 12 所示的测量图。示波器每格时间为 10 ms, 正相当于 50 Hz 电压的半周期, 可以看出, 10%—90% 能量上升沿时间约为 2 ms, 下降时间为 3 ms。如果提高电压, 响应速度也相应变快。相分离结构中液晶微滴越小, 则响应时间越短, 但是会引起驱动电压阈值的升高。因此, 相分离结构所产生的液晶微滴尺寸是影响驱动电压阈值和反应时间的重要因素。

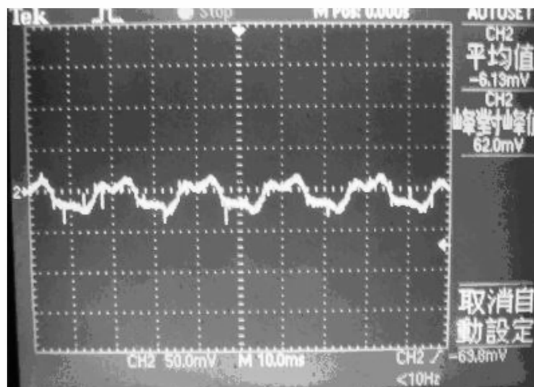


图 12 H-PDLC 全息透镜反应时间测量图

4. 结 论

聚合物分散液晶材料具有电控折变的性质, 结合 H-PDLC 全息技术可以研制具有良好成像性质和快速响应时间特性, 具有电控变焦功能的透镜。文章利用耦合波方程计算模拟理想 H-PDLC 纯位相光栅衍射特性, 并考虑了相分离程度系数对衍射效率的影响。实验制作了衍射效率最高为 70% 的 H-PDLC 电控透镜样品, 并研究了 H-PDLC 全息透镜的成像特性, 电控开关特性和响应时间特性。理论分析和实验研究表明, H-PDLC 全息透镜的相分离结构和液晶微滴尺寸是决定器件的衍射效率, 电控特性和响应时间的关键因素, 因此需要在 H-PDLC 材料和技术上进一步优化结构, 控制微滴尺寸, 得到更好的实验结果。

[1] Sutherland R L, Natarajan L V, Tondiglia V P 1995 *Proc. SPIE* **2404** 132

[2] Domash L, Crawford G, Ashmead A 2000 *SPIE* **4107** 46

[3] Tondiglia V P, Sutherland R L, Natarajan L V 2008 *Opt. Lett.* **33** 1890

[4] Vita F, Lucchetta D E, Castagna R 2007 *JOSA B* **24** 471

- [5] Zheng Z G, Li W C, Liu Y G, Xuan L 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 7344 (in Chinese) [郑致刚、李文萃、刘永刚、宣丽 2008 物理学报 **57** 7344]
- [6] Zhang B, Liu Y J, Xu K S, 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 1850 (in Chinese) [张斌、刘言军、徐克璿、2004 物理学报 **53** 1850]
- [7] Zheng J H, Zhong Y W, Cai M R 2007 *Acta Optica Sinica* **27** 1107 (in Chinese) [郑继红、钟阳万、蔡明荣 2007 光学学报 **27** 1107]
- [8] Zheng J H, Gu L J, Zhang X D 2005 *Acta Optica Sinica* **25** 1095 (in Chinese) [郑继红、顾玲娟、张兴德 2005 光学学报 **25** 1095]
- [9] Zheng J H, Gu L J, Zhuang S L 2006 *Chinese Journal of Lasers* **8** 1087 (in Chinese) [郑继红、顾玲娟、庄松林 2006 中国激光 **8** 1087]
- [10] Liu Y J, Sun X W, Wang Q, Luo D 2007 *Opt. Exp.* **25** 16645
- [11] Ren H W, Wu J R, Fan Y H, Lin Y H, Wu S T 2005 *Opti. Lett.* **30** 376
- [12] Ren H W, Fan Y H, Wu S T 2004 *Opti. Lett.* **29** 1608
- [13] Ren H W, Fan Y H, Lin Y S, Wu S T 2005 *Opt. Commu.* **247** 101
- [14] Fan Y H, Ren H W, Liang X 2005 *Journal of Display Technology* **1** 151
- [15] Liu Y J, Sun X W, Wang Q 2006 *Journal of Crystal Growth* **288** 192
- [16] Dai H T, Liu Y J, Sun X W, Luo D *Opt. Exp.* **17** 4317
- [17] Ren H W, Fan Y H, Sebastian Gauza, Wu S T 2004 *Appl. Phys. Lett.* **84** 4789
- [18] LIN Y H, Ren H W, Kuan-Hsu 2005 *Japanese Journal of Applied Physics* **44** 243
- [19] Liu Y J, Sun X W, Shum P 2006 *Optics Express* **14** 5634
- [20] Zhou H X, Cheng Y F 2006 *Holography optics- design, fabrication and application* (Beijing: Chemistry Press) (in Chinese) [周海宪、程云芳 2006 全息光学-设计、制造和应用 (北京:化学工业出版社)]
- [21] Zheng Z G, Ma J, Song J, Liu Y G, Hu L F, Xuan L 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 15 (in Chinese) [郑致刚、马骥、宋静、刘永刚、胡立发、宣丽 2007 物理学报 **56** 15]
- [22] Zheng Z G, Song J, Zhang L L 2008 *Chin. Phys. B* **17** 3227
- [23] Chen K, Cheng J Q, Xiao Y, Tang D G, Huang M J 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 1007 (in Chinese) [陈珂、程建群、肖勇、唐道广、黄明举 2009 物理学报 **58** 1007]
- [24] Zhang B, Liu Y J, Jia Y, Xu K S 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 91 (in Chinese) [张斌、刘言军、贾瑜、徐克璿 2003 物理学报 **52** 91]
- [25] Kogelnik H 1969 *Bell, Syst. Tech. J.* **48** 2909
- [26] Liu Y J, Sun X W, Dai H T 2005 *Optical Material* **27** 1451
- [27] Wu B G, Erdmann J H, Doane J W 1991 *Liq. Cryst.* **5** 327
- [28] Musto P, Petti L, Ragosta 2000 *Appl. Phys. B* **70** 249

Diffraction and properties of holographic polymer dispersed liquid crystal switchable lens^{*}

Zheng Ji-Hong^{1)†} Zhong Yang-Wan²⁾ Wen Ken¹⁾ Luo Xin-Sheng¹⁾ Zhuang Song-Lin¹⁾

1) (Shanghai Key Laboratory of Modern Optical System, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

2) (Information Engineering College, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, China)

(Received 12 May 2009; revised manuscript received 10 June 2009)

Abstract

A holographic polymer dispersed liquid crystal (H-PDLC) switchable lens is reported. The diffraction efficiency was analyzed at different phase separation coefficients within the visible band (400—800 nm) with the coupled wave theory for a phase-type H-PDLC switchable lens. In our experiments, the maximum efficiency of 70% was achieved. The H-PDLC switchable lens shows excellent imaging performance and fast response. It is potentially useful in many applications, such as optical communications, optical imaging, e. g., in digital cameras.

Keywords: polymer dispersed liquid crystal, focus-switchable lens, phase separation coefficient, imaging properties

PACC: 4270D, 4240E

* Project supported by the National Natural Science Foundation for Young Scholars of China (Grant No. 60801041), Shanghai International Cooperation Foundation for Development of Science and Technology (Grant No. 08530707400), Shanghai Education Committee Research Funding (Grant No. 09YZ227) and Shanghai Key Laboratory, Leading Academic Discipline Projects (Grant Nos. 08DZ2272800, S30502).

† E-mail: jihongzheng2002@yahoo.com.cn