

# 基于聚合物分散液晶的二维六角晶格 变间距光栅的研制

缪涛<sup>1,2</sup>, 郑继红<sup>1,2\*</sup>, 王康妮<sup>1,2</sup>, 刘悠嵘<sup>1,2</sup>, 黄新荣<sup>1,2</sup>, 朱天贇<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>上海理工大学光电信息与计算机工程学院, 上海 200093;

<sup>2</sup>上海理工大学上海市现代光学系统重点实验室, 上海 200093

**摘要** 利用柱面波与平面波干涉形成一种二维(2D)全息聚合物分散液晶(H-PDLC)变间距光栅。为了使聚合物与液晶分离得更加彻底,采用曝光强度为 16 mW/cm<sup>2</sup>、波长为 532 nm 的激光进行实验,并且两次曝光时间分别为 2 s 和 60 s,通过将样品二次曝光和旋转 60°形成 2D 六角晶格 H-PDLC 变间距光栅,分别研究了光栅的理论周期变化范围、衍射特性、电控特性以及影响光栅周期变化的参数分析。结果表明:在半径为 6 mm 的圆形范围内,光栅的周期变化区间为 1.804~2.281 μm,与理论计算所得结果基本一致。在没有加载电压的情况下,一级衍射效率达 18.3%,当加载电压达到 90 V 时,零级衍射效率由 15.6%增加至 73%。该光栅具有变周期和电控特性,在衍射光学领域具有潜在的应用价值,可用于染料掺杂 2D H-PDLC 光栅的可调谐多波长有机激光器的研究。

**关键词** 光栅; 聚合物分散液晶; 变间距光栅; 衍射特性; 电控特性; 衍射效率

中图分类号 O438

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.0809001

## Development of Two-Dimensional Hexagonal Lattice Variable Line-Space Grating Based on Polymer-Dispersed Liquid Crystal

Miao Tao<sup>1,2</sup>, Zheng Jihong<sup>1,2\*</sup>, Wang Kangni<sup>1,2</sup>,  
Liu Yourong<sup>1,2</sup>, Huang Xinrong<sup>1,2</sup>, Zhu Tianyun<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

<sup>2</sup>Shanghai Key Laboratory of Modern Optical System, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China

**Abstract** A two-dimensional (2D) holographic polymer-dispersed liquid crystal (H-PDLC) variable line-space grating is fabricated by interference between cylindrical wave and plane wave. In order to separate polymer from liquid crystal more evidently, we use a 532 nm laser with exposure intensity of 16 mW/cm<sup>2</sup> in experiment, and two exposure time is 2 s and 60 s, respectively. We use double exposure and rotate the sample 60° to form 2D hexagonal lattice H-PDLC variable line-space grating. The theoretical periodic variation rang of grating, diffraction properties, electronic control characteristics and analysis of parameters affecting the periodic change of grating are studied, respectively. The results show that, in the circular range with a radius of 6 mm, the periodic variation range of the grating is 1.804-2.281 μm, which is basically consistent with the theoretical calculation. The first-order diffraction efficiency is 18.3% without external voltage, and the zero-order diffraction efficiency increases from 15.6% to 73% with an applied voltage of 90 V. Due to variable period and electronic control characteristics, this grating has potential application in diffraction optics, such as the research of tunable multi-wavelength organic laser for dyedoped 2D H-PDLC grating.

**Key words** gratings; polymer-dispersed liquid crystal; variable line-space grating; diffraction properties; electronic control characteristics; diffraction efficiency

**OCIS codes** 220.4241; 230.1950; 230.3720

收稿日期: 2018-02-06; 修回日期: 2018-03-26; 录用日期: 2018-04-03

基金项目: 上海市科学技术委员会科研计划(18060502500)

\* E-mail: jihongzheng@sina.com

## 1 引言

光栅作为重要的光学元件,因其独特的衍射特性,广泛应用于各种光学光子器件,如:输入输出耦合器、窄带滤波器、分布式反馈激光器及布拉格反射器<sup>[1-3]</sup>等。其中,变间距光栅是具有多种周期的光栅,其具有自聚焦、像差校正、高分辨率<sup>[4-5]</sup>等优点,近年来被广泛地研究。陈建文等<sup>[6]</sup>于1986年提出了制作变间距光栅的新方法;Wilbur等<sup>[7]</sup>使用弹性膜制造了变间距光栅;Liu等<sup>[8]</sup>用柱透镜代替三棱柱采用一步法制备了变周期布拉格反射光栅;Kim等<sup>[9]</sup>利用一片柱面镜代替平面镜的洛埃镜系统制备了变周期的二维(2D)全息光刻光栅。但目前对于2D六角晶格全息聚合物分散液晶(H-PDLC)变间距光栅的报道却很少。聚合物分散液晶(PDLC)是微米尺寸的液晶随机分散在聚合物基质中形成的一种可以电调控的材料,由于聚合物的光敏感性,PDLC可以作为全息记录材料<sup>[10-11]</sup>。PDLC被广泛地应用于变焦透镜<sup>[12]</sup>、光学开关<sup>[13]</sup>、全息一维、2D光栅<sup>[14-16]</sup>等。

本文报道了一种制作2D六角晶格H-PDLC变间距光栅的简便方法。在双路干涉光路中插入柱面镜使柱面波与平面波干涉,经过第一次曝光后逆时针旋转样品 $60^\circ$ 进行第二次曝光,将两次曝光的干涉条纹写入PDLC,形成2D六角晶格H-PDLC变间距光栅。聚合物在整个样品区域对角线方向的分布为正六边形,在非对角线区域的分布为不规则的六边形。此外,可以通过在氧化铟锡(ITO)导电膜上加电压的方式改变光栅的一级衍射效率与中心透射率。当需要使用不同周期的光栅时,本文提出的2D变间距光栅可以取代不同周期光栅的组合,从而减小器件的尺寸。同时,作为一种具有变周期和电控特性的嵌入式光栅,它可用于可调谐多波长有机激光器的研究。

## 2 光栅的制备

在本实验中,制备PDLC材料的体系包括:液晶(TEB50,北京清华亚王液晶材料有限公司生产,质量分数为34.76%)、预聚合物单体(EB8301,比利时UCB公司生产,质量分数为44.71%)、交联剂(1-vinyl-2-pyrrolidinoe, N-vinylpyrrolidone, 美国Sigma-Aldrich公司生产,质量分数为9.94%)、光引发剂(rose bengal, 美国Sigma-Aldrich公司生产,质量分数为0.4%)、表面活性剂(S-271, 美国 Chem

Service公司生产,质量分数为9.94%)、纳米银(北京纳辰纳米材料公司,颗粒粒径为50 nm,质量分数为0.05%)。其中,纳米银颗粒可以改变H-PDLC光栅的电光特性<sup>[17-18]</sup>。液晶的寻常光折射率 $n_o = 1.524$ ,折射率差 $\Delta n = 0.1896$ ,介电各向异性 $\Delta\xi = \xi_{\parallel} - \xi_{\perp} = 11.5$ , $\xi_{\parallel} = 17.3$ ,预聚合物单体的折射率为 $n_p = 1.49$ 。

将上述材料在暗室中按照一定比例进行配比混合,用超声乳化仪混合、加热均匀后静置24~48 h,形成纳米银掺杂型PDLC材料,将材料均匀放置在两片镀有ITO导电膜的玻璃片间,用间隔子控制光栅厚度为20  $\mu\text{m}$ 。将此材料置于图1(a)所示的曝光光路中进行曝光操作。

实验光路如图1(a)所示,型号为Verdi 2W的固体激光器产生的532 nm激光用于干涉。激光经过小孔滤波器和准直透镜后变成一束平行光,光阑控制光斑的直径为12 mm,经非偏振分光棱镜后,光束一分为二。在其中一束光路中加入一个焦距为200 mm的柱透镜,两束相干光的中心夹角 $\alpha = 16^\circ$ ,柱透镜与样品的距离为395 mm,将经过柱透镜形成的柱面波与平面波的干涉条纹记录在PDLC中,由于聚合物的光敏感性,会导致亮条纹处富聚合物,暗条纹处富液晶。图1(b)为样品区域在水平方向不同位置处两束光的夹角变化, $\theta_1 < \theta_2 < \theta_3$ 。第一次曝光2 s后,如图1(c)所示逆时针旋转 $60^\circ$ ,进行第二次曝光(60 s),因此,会在样品区形成2D变间距结构。图1(d)为计算机模拟的2D干涉条纹,可以看出,沿水平向右方向和斜向右 $60^\circ$ 方向,干涉条纹逐渐增大,沿着白色虚线区域为对称六角晶格,在其他区域为非对称六角晶格。

实验中,为了使聚合物与液晶达到较好的分离效果,需要严格控制曝光光强以及两次曝光的时间。在实验过程中发现,当两束光的总光强为 $19 \text{ mW}/\text{cm}^2$ 时,第一次曝光仅几秒后,聚合物与液晶相分离的结构已经固化,完全限制了第二次曝光。经多次测试,选取曝光光强为 $16 \text{ mW}/\text{cm}^2$ 。在曝光光强确定的情况下,两次曝光时间也需严格控制,第一次曝光是为了使预聚物单体初始聚合,由于光引发自由基反应具有不可逆的特性,因此第一次曝光时间应远短于第二次曝光时间,此时生成的自由基少,固化速率小,单体生长时间充足,两者相互扩散非常充足。实验对比了曝光时间分别为2 s/60 s、4 s/60 s、5 s/60 s(首次曝光时间/二次曝光时间)时聚合物和液晶相的分离情况,如图2所示。由

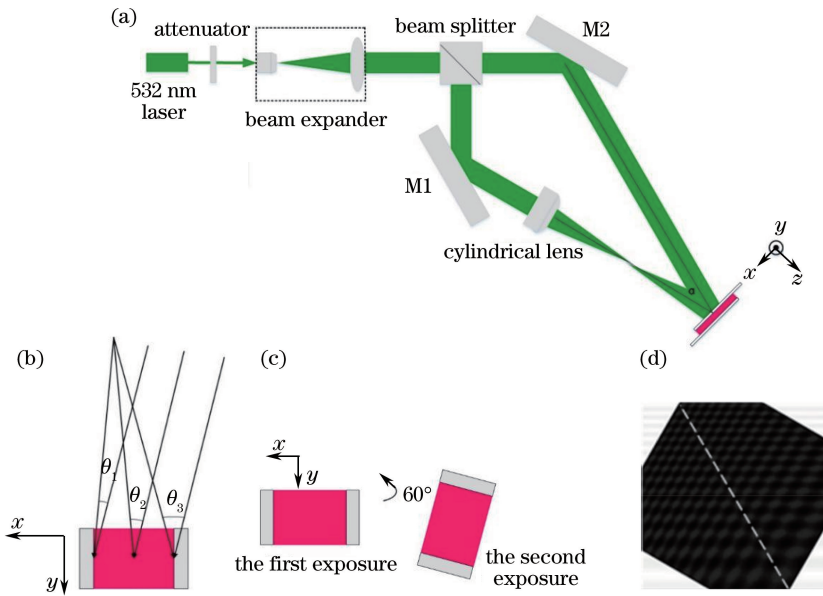


图 1 (a) 实验光路图; (b) 曝光面干涉角度变化图; (c) 样品旋转角度图; (d) 理论模拟 2D 变间距光栅图  
 Fig. 1 (a) Experimental light path diagram; (b) interference angle variation diagram of exposure surface; (c) sample rotation angle diagram; (d) theoretical simulation diagram of 2D variable spacing grating

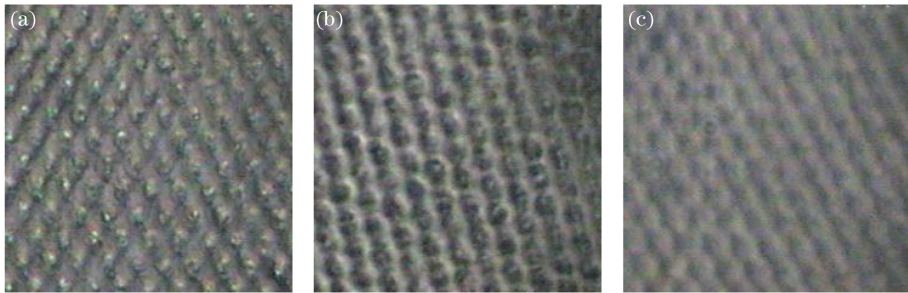


图 2 不同曝光时间下聚合物与液晶分离的微观结构图。(a) 2 s/60 s; (b) 4 s/60 s; (c) 5 s/60 s  
 Fig. 2 Microstructural diagrams of polymer and liquid crystal separation at different exposure time.  
 (a) 2 s/60 s; (b) 4 s/60 s; (c) 5 s/60 s

图 2 可以清楚地看出, 在 2 s/60 s 的曝光时间下, 聚合物和液晶分离得最好, 结构最清晰。

### 3 光栅周期变化的理论分析

根据图 1 所示光路图, 将一块柱透镜放在其中的一条光路中, 就会形成平面波与柱面波的干涉光场, 形成的干涉条纹间距是连续变化的<sup>[6]</sup>, 其中两束光的中心夹角为  $16^\circ$ 。Zhu 等<sup>[19]</sup> 已经对一维变间距光栅的周期进行了理论推导。本研究建立了图 3 所示的变间距光栅理论模型, 并建立了斜坐标系, 以便接下来对该光栅不同位置处的周期进行理论计算。第一次曝光后形成聚合物与液晶交替的一维变间距光栅, 将样品旋转  $60^\circ$ , 第二次曝光形成的 2D 变间距光栅如图 3 所示: 沿着红色虚线(即  $x = -y$ ) 的区

域为对称六角晶格(白色六边形), 宏观表现为衍射光斑, 为正六边形; 在其他区域为非对称六角晶格(黄色六边形), 宏观表现为衍射光斑, 为非正六边形。同时, 从左上到右下区域, 晶格大小逐渐增大, 即光栅的周期逐渐增大。假设柱透镜可以作为薄透镜来处理, 在光路中插入柱透镜使入射波前的相位受到延迟, 对入射光波的作用相当于一个透射系数为  $t(x_i, y_i)$  的相位物体, 可以表示为

$$t(x_i, y_i) = \exp\left\{-ik \frac{(n-1)}{2R} x_i^2\right\}, \quad (1)$$

式中:  $n$  为柱透镜的折射率;  $R$  为柱透镜的曲率半径;  $x_i$  和  $y_i$  为相对于柱透镜的横坐标和纵坐标;  $k$  为入射波的波数,  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ ,  $\lambda$  为波长。

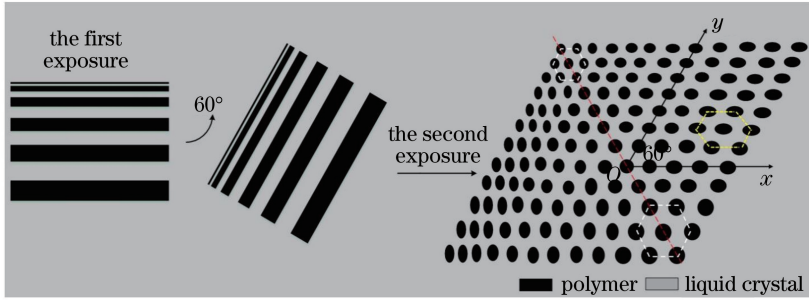


图 3 2D 变间距光栅斜坐标图

Fig. 3 Skew coordinate diagram of 2D variable spacing grating

振幅为  $A$ 、波长为  $\lambda$  的平面光波垂直入射到柱透镜前表面时,在紧靠柱透镜后表面处的透射光波的复振幅为

$$U_0(x_i, y_i) = A \exp\left\{-ik \frac{(n-1)}{2R} x_i^2\right\}. \quad (2)$$

该光束以与全息干涉记录面垂直方向呈  $\frac{\alpha}{2}$  的夹角入射到全息干涉记录面,当经过柱透镜的光波到达全息干涉记录面的传播满足 Fresnel 衍射条件时,该光束在全息记录面上的复振幅可以表示为

$$U_1(x, y) = \frac{A}{i\lambda D} \iint P(x_i, y_i) \exp\left\{-ik \frac{(n-1)}{2R} x_i^2\right\} \cdot \exp\left\{\frac{ik}{2D} [(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2]\right\} \cdot \exp\left\{-ikx \sin \frac{\alpha}{2}\right\} dx_i dy_i, \quad (3)$$

式中: $D$  为柱透镜与全息干涉记录面间的距离; $P(x_i, y_i)$  为 1 表示光瞳内, $P(x_i, y_i)$  为 0 表示光瞳外。

另外一束光以与全息干涉记录面垂直方向呈  $\frac{\alpha}{2}$  的夹角入射到全息干涉记录面,其复振幅可以表示为

$$U_2(x, y) = A \exp\left(-ikx \sin \frac{\alpha}{2}\right). \quad (4)$$

因此,全息干涉记录面上的光强分布可以表示为

$$I(x, y) = |U_1(x, y) + U_2(x, y)|^2. \quad (5)$$

由(5)式可以知道全息干涉记录面上的条纹对于图 3 中  $x$  轴的不同位置是变化的。根据光强分布的极大值条件以及条纹可见度可知,光栅周期  $\Lambda$  可以近似表示为

$$\Lambda = \frac{\lambda}{\frac{(n-1)x}{D(n-1)-R} + 2\sin \frac{\alpha}{2}}, \quad (6)$$

式中: $\lambda=532 \text{ nm}$ 。当  $x=0$  时,可以计算出水平方向光栅中心处的周期。

同理,在图 3 中沿着  $y$  轴方向的光栅周期可以采用相同的计算公式。根据(6)式可以计算得出在光栅中心位置处,即  $(x, y) = (0, 0)$  处,  $\Lambda = 1.911 \mu\text{m}$ 。整个光斑区域为半径为 6 mm 的圆形区域,由(6)式可以计算出整个光栅面上周期的理论变化范围为  $1.721 \sim 2.149 \mu\text{m}$ 。

#### 4 光栅特性分析

为了探测该光栅的衍射特性,用 633 nm 的氦氖激光器作为探测光垂直入射到光栅表面,在观察面处观察光栅的衍射光斑变化,并计算不同位置处的光栅周期,如图 4 所示。

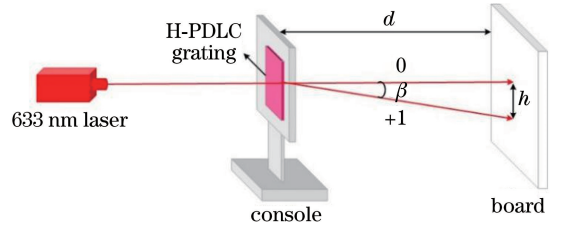


图 4 周期测量装置图

Fig. 4 Device diagram of period measurement

图 4 中, $d$  表示观察面与光栅之间的距离, $h$  为正一级衍射光斑与零级透射光斑之间的距离, $\beta$  为一级衍射角。可以计算得出  $\beta = \arctan \frac{h}{d}$ ,根据光栅周期公式  $\Lambda \sin \beta = m\lambda$  得到光栅周期,其中  $m$  为衍射级次。这里,选取 3 个位置进行计算,分别为图 3 所示沿红色虚线(即光栅对角线)方向上周期最大、中间、最小处,其周期测量值分别为  $2.281, 2.013, 1.804 \mu\text{m}$ ,这与理论计算值  $2.149, 1.911, 1.721 \mu\text{m}$  非常吻合,光栅周期的理论变化范围为  $0 \sim 0.428 \mu\text{m}$ ,实际变化范围为  $0 \sim 0.477 \mu\text{m}$ ,误差约为 11.4%。这种误差是由温度升高以及聚合物的收缩造成的<sup>[20-21]</sup>,两者的共同作用会导致光栅膨胀或收缩,这取决于谁占主导作用。在湿度一定的情



况下,温度升高会导致光栅周期增大<sup>[21]</sup>,在制作光栅以及测量衍射时,光栅均处于高强度激光照射下,势必导致温度升高,而温度升高会导致光栅体积膨胀、周期增大,并且光栅的膨胀要大于聚合物自身的收缩,所以出现了测量时周期值大于理论计算值。图5(a)~(d)分别对应对角线上光栅周期由小到大三处位置的衍射光斑以及非对角线区域的衍射光斑,从图中可以清晰地看出,沿对角线区域的衍射光斑呈正六角格子,并且一级衍射光与零级衍射光间的距离依次

减小,而位于非对角线区域处以布拉格角度入射时,衍射光斑呈不规则的六角格子形状,这意味着此区域 $x,y$ 方向的周期不同。该现象与理论结果相同。为了验证实验的准确性,拍摄了该光栅的微观结构图。图5(e)~(h)分别对应对角线上光栅周期由小到大位置处的微观形貌以及非对角线区域光栅的微观形貌。可以清晰地看出,在对角线区域中,光栅的周期逐渐变化,且光栅形貌为正六边形,而位于对角线区域外的光栅形貌则表现为不规则的六边形。

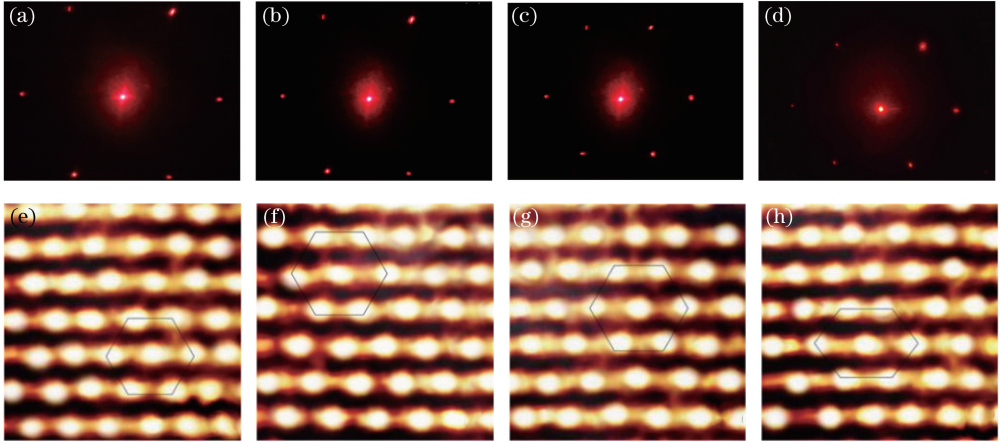


图5 (a)对角线左上区域处、(b)对角线中心区域处、(c)对角线右下区域处、(d)非对角线区域处的衍射光斑;  
(e)对角线左上区域处、(f)对角线中心区域处、(g)对角线右下区域处、(h)非对角线区域处光栅的原子力显微镜微观结构图  
Fig. 5 Diffraction spot maps at (a) diagonal upper left corner area, (b) diagonal center area, (c) diagonal lower right corner area, (d) off-diagonal area; atomic force microscope micro structure maps of grating at (e) diagonal upper left corner area, (f) diagonal center area, (g) diagonal lower right corner area, (h) off-diagonal area

对于该2D变周期H-PDLC光栅,除了具有周期变化的特性,还具备电调谐特性,其衍射效率随着外加电压的增加而逐渐减小。在该光栅两端加载频率为50 Hz的交流电,逐渐增加两端电压,中心透射光明显增强,一级衍射光强明显减弱,如图6所示。同时,本实验还记录了零级衍射效率(零级衍射光的光强与激光总入射光强之比)和一级衍射光的衍射效率(一级衍射光中最亮光斑的光强与激光总入射光强之比)随电压增加的变化趋势,如图7所示。当

外加电压为0 V时,该光栅的零级衍射效率为15.6%、一级衍射效率为18.3%,较之前利用四光束<sup>[22]</sup>和掩膜板<sup>[23]</sup>曝光的2D恒定周期的H-PDLC光栅一级衍射效率10%和3%有了很大提升。当加载电压逐渐增大时,液晶微滴的指向矢方向沿着电场方向排列,聚合物与液晶的折射率差逐渐减小,此时衍射光减弱,透射光增强;当电压增加到90 V时,零级衍射效率为73%、一级衍射效率为2%;若继续增加电压,光栅会被击穿。本实验光栅的衍射

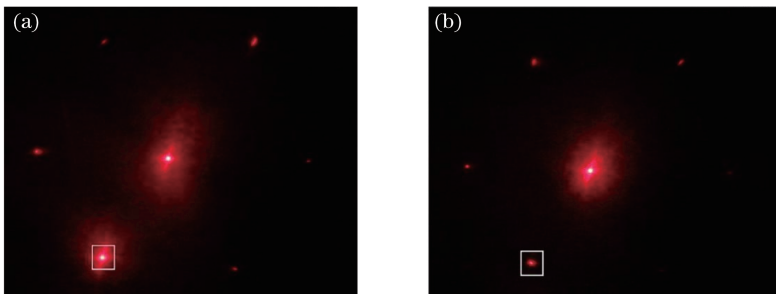


图6 (a)未加电压时和(b)加载电压时的衍射光斑  
Fig. 6 Diffraction spots (a) without and (b) with applied voltage

效率可以通过改善材料配比以及曝光条件来进一步提升。

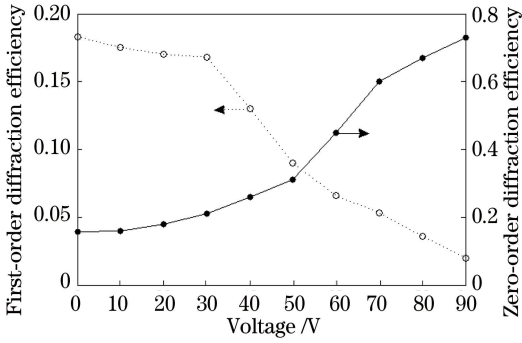


图 7 一级衍射效率、零级衍射效率随加载电压的变化

Fig. 7 First-order diffraction efficiency and zero-order diffraction efficiency as functions of applied external voltage

### 5 影响光栅周期的参数分析

为了在实际应用中制备周期变化符合要求的 2D 六角晶格 H-PDLC 变间距光栅,需要对影响光栅周期的因素进行讨论。由(6)式可以知道周期的

变化与柱透镜焦距  $f$ 、干涉光束夹角  $\alpha$ 、柱透镜与曝光面的距离  $D$  以及光源波长  $\lambda$  有关。由于本实验曝光使用的是 532 nm 激光,此处不再讨论波长的影响。根据(6)式理论模拟了  $f$  为 10, 20, 30 cm, 干涉光束夹角  $\alpha$  为  $12^\circ$ 、 $16^\circ$ 、 $20^\circ$  以及  $D$  为 35.0, 39.5, 45.0 cm 时周期的变化情况,如图 8 所示。图 8(a1) 为不同  $D$  下,周期随着位置的变化;图 8(a2) 为周期变化率随位置的变化。从图中可以看出周期的变化区间分别为  $[1.671 \mu\text{m}, 2.232 \mu\text{m}]$ 、 $[1.721 \mu\text{m}, 2.149 \mu\text{m}]$ 、 $[1.760 \mu\text{m}, 2.092 \mu\text{m}]$ , 变化范围分别为 0.561, 0.428, 0.332  $\mu\text{m}$ 。即:在其他参数一定的情况下,随着  $D$  增加,周期的变化逐渐减小,相同位置处的周期变化率减小。另外,光栅面左上角的周期变化率小于右下角的周期变化率。图 8(b) 为不同  $f$  下,周期以及周期变化率随位置的变化关系。周期的变化区间分别为  $[1.781 \mu\text{m}, 2.062 \mu\text{m}]$ 、 $[1.721 \mu\text{m}, 2.149 \mu\text{m}]$ 、 $[1.558 \mu\text{m}, 2.472 \mu\text{m}]$ , 变化范围分别为 0.281, 0.428, 0.914  $\mu\text{m}$ 。可以看出,随着  $f$  增加,周期的变化范围逐渐增大,相同位置处

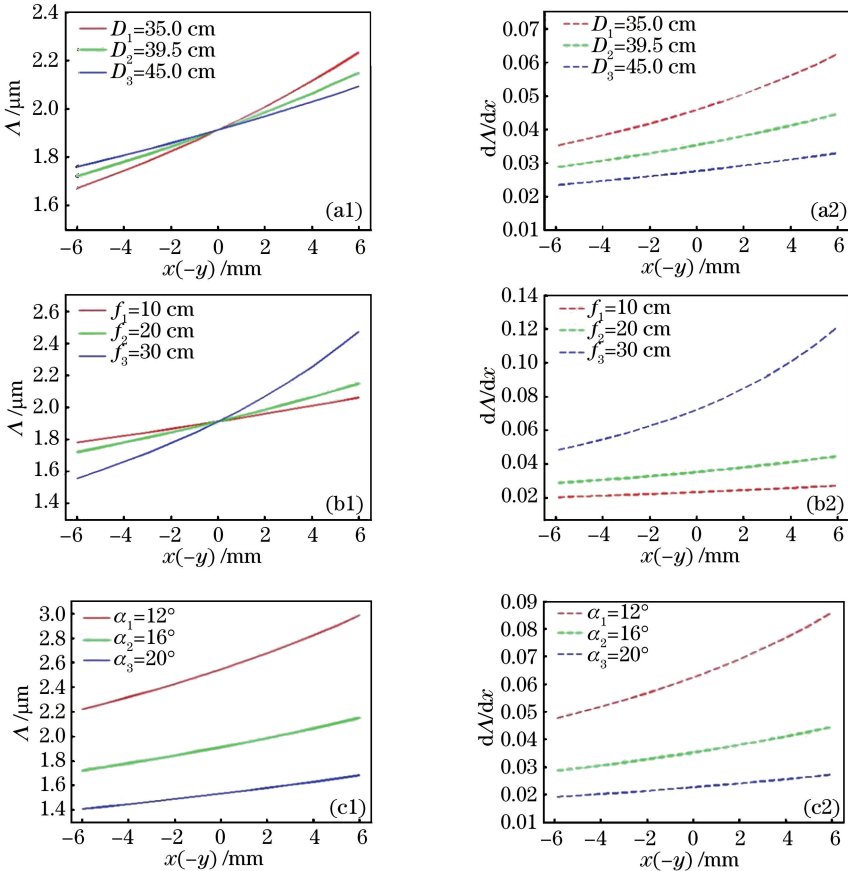


图 8 (a) 不同  $D$  下的周期变化曲线;(b) 不同  $f$  下的周期变化曲线;(c) 不同  $\alpha$  下的周期变化曲线

Fig. 8 (a) Periodic variation curves at different  $D$ ; (b) periodic variation curves at different  $f$ ;

(c) periodic variation curves at different  $\alpha$

的周期变化率增大,并且光栅面左上角的周期变化率小于右下角的周期变化率。图 8(c)为不同  $\alpha$  下,周期以及周期变化率随位置的变化,周期的变化区间分别为  $[2.218 \mu\text{m}, 2.984 \mu\text{m}]$ 、 $[1.721 \mu\text{m}, 2.149 \mu\text{m}]$ 、 $[1.407 \mu\text{m}, 1.681 \mu\text{m}]$ ,变化范围分别为  $0.766, 0.428, 0.274 \mu\text{m}$ 。可以看出,随着  $\alpha$  增加,周期的变化范围逐渐减小,周期变化率减小。光栅面左上角的周期变化率也小于右下角的周期变化率。综上所述,在不同情况下光栅周期的变化情况各不相同,但在整个光栅面上左上角的周期变化率总是小于右下角的周期变化率。因此,在实际应用中,可以通过改变柱透镜的焦距、干涉光束的夹角以及柱透镜到曝光面的距离来制备符合要求的 2D 六角晶格 H-PDLC 变间距光栅。

## 6 结 论

通过柱面波与平面波干涉,二次曝光时将样品旋转  $60^\circ$  的方法制备了 2D 六角晶格 H-PDLC 变间距光栅,不仅实现了光栅在两个方向上的周期变化,还使得光栅具备电控的特性。实验测得了在半径为 6 mm 的圆形光栅区域,周期的变化区间为  $[1.804 \mu\text{m}, 2.281 \mu\text{m}]$ ,这与理论计算结果基本吻合;在对角线方向,衍射光斑呈现规则的正六边形,在非对角线区域,衍射光斑呈现不规则的六边形。此外,通过在 ITO 导电膜上加载电压,测得当电压加载到 90 V 时,零级衍射效率为 73%,较未加电压时的零级衍射效率 15.6%有了很大变化,说明该结构具备良好的电控特性。最后,模拟得出了柱透镜焦距、柱透镜与曝光面之间的距离以及干涉光夹角对光栅周期变化范围和变化率的影响。该光栅同时具备了两个维度周期变化的特点以及电控特性,在光谱分析、光电探测领域具有潜在的应用价值。

## 参 考 文 献

- [1] Masanovic G Z, Reed G T, Headley W, *et al.* A high efficiency input/output coupler for small silicon photonic devices[J]. *Optics Express*, 2005, 13(19): 7374-7379.
- [2] Alferness R C, Joyner C H, Divino M D, *et al.* Narrowband grating resonator filters in InGaAsP/InP waveguides[J]. *Applied Physics Letters*, 1986, 49(3): 125-127.
- [3] Baba T, Hamasaki M, Watanabe N, *et al.* A novel short-cavity laser with deep-grating distributed Bragg reflectors[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 1996, 35: 1390-1394.
- [4] Hall J T. Focal properties of a plane grating in a convergent beam[J]. *Applied Optics*, 1966, 5(6): 1051-1055.
- [5] Shi L, Hao D F. Theory and applications of varied line-space gratings [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2001, 9(3): 284-287.  
时轮, 郝德阜. 变栅距衍射光栅的原理及应用[J]. *光学精密工程*, 2001, 9(3): 284-287.
- [6] Chen J W, Fu S F, Zhang D K, *et al.* Producing grating with variable spacing[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 1986, 13(5): 291-294.  
陈建文, 傅淑芬, 张大可, 等. 制作变间距光栅的新方法[J]. *中国激光*, 1986, 13(5): 291-294.
- [7] Wilbur J L, Jackman R J, Whitesides G M, *et al.* Elastomeric optics [J]. *Chemistry of Materials*, 1996, 8(7): 1380-1385.
- [8] Liu K, Xu H N, Hu H F, *et al.* One-step fabrication of graded rainbow-colored holographic photopolymer reflection gratings [J]. *Advanced Materials*, 2012, 24(12): 1604-1609.
- [9] Kim H, Jung H, Lee D H, *et al.* Period-chirped gratings fabricated by laser interference lithography with a concave Lloyd's mirror[J]. *Applied Optics*, 2016, 55(2): 354-359.
- [10] Bunning T J, Natarajan L V, Tondiglia V P, *et al.* Holographic polymer-dispersed liquid crystals (H-PDLCs) [J]. *Annual Review Materials*, 2000, 30(1): 83-115.
- [11] Liu Y J, Sun X W. Holographic polymer-dispersed liquid crystals: materials, formation, and applications [J/OL]. *Advances in OptoElectronics* (2009-04-27). <https://doi.org/10.1155/2008/684349>.
- [12] Ren H W, Fan Y H, Lin Y H, *et al.* Tunable-focus microlens arrays using nanosized polymer-dispersed liquid crystal droplets[J]. *Optics Communications*, 2005, 247(1/2/3): 101-106.
- [13] Liu Y J, Sun X W, Liu J H, *et al.* A polarization insensitive  $2 \times 2$  optical switch fabricated by liquid crystal-polymer composite [J]. *Applied Physics Letters*, 2005, 86(4): 041115.
- [14] Jeong E H, Kim B K. Holographic polymer dispersed liquid crystals using vinyltrimethoxysilane [J]. *Optics Communications*, 2009, 282(8): 1541-1545.
- [15] Wu S T, Fuh A Y G. Color dispersion in two-dimensional phase array based on polymer-dispersed liquid crystal film [J]. *Optics Communications*, 2008, 281(6): 1732-1738.
- [16] Gao H, Zheng J H, Wang K N, *et al.* Fabrication

- and application of a tri-color excited holographic polymer dispersed liquid crystal volume gratings[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(3): 0306002.
- 高辉, 郑继红, 王康妮, 等. 三色激发聚合物分散液晶体光栅的制备及应用[J]. 中国激光, 2016, 43(3): 0306002.
- [17] Zhang M H, Zheng J H, Gui K, *et al.* Electro-optical characteristics of holographic polymer dispersed liquid crystal gratings doped with nanosilver [J]. Applied Optics, 2013, 52(31): 7411-7418.
- [18] Wang K N, Zheng J H, Gui K, *et al.* Surface plasmon resonance of holographic polymer dispersed liquid crystal grating doped with nano-Ag[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(2): 021603.
- 王康妮, 郑继红, 桂坤, 等. 纳米银掺杂的液晶/聚合物全息光栅中的表面等离子体共振[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(2): 021603.
- [19] Zhu H F, Chen J W, Gao H Y, *et al.* A new method to produce high spatial frequency grating with variable spacing[J]. Acta Physica Sinica, 2005, 54(2): 682-686.
- 朱化凤, 陈建文, 高鸿奕, 等. 高频可变间距全息光栅的制作方法的计算机模拟研究[J]. 物理学报, 2005, 54(2): 682-686.
- [20] Qi J, DeSarkar M, Warren G T, *et al.* *In situ* shrinkage measurement of holographic polymer dispersed liquid crystals [J]. Journal of Applied Physics, 2002, 91(8): 4795-4800.
- [21] Naydenova I, Jallapuram R, Toal V, *et al.* Characterisation of the humidity and temperature responses of a reflection hologram recorded in acrylamide-based photopolymer [J]. Sensors and Actuators B, 2009, 139(1): 35-38.
- [22] Zheng Z G, Song J, Liu Y G, *et al.* Single-step exposure for two-dimensional electrically-tunable diffraction grating based on polymer dispersed liquid crystal[J]. Liquid Crystals, 2008, 35(4): 489-499.
- [23] Liu Y J, Sun X W. Electrically tunable two-dimensional holographic photonic crystal fabricated by a single diffractive element [J]. Applied Physics Letters, 2006, 89(17): 171101.