

聚合物分散液晶柔性全息曲面光栅的研究

李鹏飞, 张伟伟, 申桐, 康彪, 郑继红

引用本文:

李鹏飞, 张伟伟, 申桐, 等. 聚合物分散液晶柔性全息曲面光栅的研究[J]. 液晶与显示, 2021, 36(2): 237–245.

LI Peng-fei, ZHANG Wei-wei, SHEN Tong, et al. Polymer dispersed liquid crystal flexible holographic curved grating[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2021, 36(2): 237–245.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CJLCD.2020-0177>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

多壁碳纳米管掺杂的聚合物分散液晶光栅的电光特性

Electro-optical characteristics of polymer-dispersed liquid crystal gratings doped with multi-walled carbon nanotubes
液晶与显示. 2020, 35(11): 1095–1102 <https://doi.org/10.37188/YJYXS20203511.1095>

一种应用在增强现实领域的倾斜液晶/聚合物体光栅的制备

Fabrication of slanted liquid crystal/polymer volume grating applied to augmented reality
液晶与显示. 2020, 35(10): 1012–1018 <https://doi.org/10.37188/YJYXS20203510.1012>

液晶分子取向对液晶/聚合物光栅电光特性以及激光出射特性的影响

Effect of liquid crystal orientation on LC/polymer grating electro-optical properties and lasing emission properties
液晶与显示. 2018, 33(10): 844–850 <https://doi.org/10.37188/YJYXS20183310.0844>

高衍射效率光致聚合物薄膜中全息记录研究

Hologram recording in photopolymer films with high diffraction efficiency
液晶与显示. 2017, 32(7): 567–571 <https://doi.org/10.37188/YJYXS20173207.0567>

室温显示胆甾相的侧链液晶聚合物的合成与表征

Synthesis and characterization of side chain liquid crystalline polymers displaying cholesteric phase at room temperature
液晶与显示. 2020, 35(6): 524–530 <https://doi.org/10.37188/YJYXS20203506.0524>

文章编号:1007-2780(2021)02-0237-09

聚合物分散液晶柔性全息曲面光栅的研究

李鹏飞^{1,2}, 张伟伟^{1,2}, 申 桐^{1,2}, 康 彪^{1,2}, 郑继红^{1,2*}

(1. 上海理工大学 光电信息与计算机工程学院, 上海 200093;

2. 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: 本文通过将聚合物分散液晶膜包裹在固定曲率半径的聚对苯二甲酸乙二醇酯(Polyethylene terephthalate, PET)软膜内, 通过平面波干涉的全息技术, 制作了一种柔性曲面全息光栅。文章研究了柔性曲面全息光栅的衍射再现特性。使用微元法以及耦合波理论研究推导了柔性曲面光栅在曲率改变时的衍射特性公式。提出以柱面波再现曲率变化时的柔性全息光栅, 以实现最佳衍射效果再现, 论文推演了相关技术参数, 如柱面波焦点位置, 柱透镜焦距与衍射横向放大关系率等。在曝光时间为 70 s 和曝光强度为 30 mW/cm² 的条件下, 制备了中心衍射效率为 88% 的柔性光栅。实验通过改变柔性光栅的曲率半径和使用柱面波再现, 实现了理论计算的衍射横向放大率特性。

关键词: 聚合物分散液晶; 柔性光栅; 衍射效率; 衍射特性

中图分类号: O753⁺.2; O438 **文献标识码:** A **doi:** 10.37188/CJLCD.2020-0177

Polymer dispersed liquid crystal flexible holographic curved grating

LI Peng-fei^{1,2}, ZHANG Wei-wei^{1,2}, SHEN Tong^{1,2}, KANG Biao^{1,2}, ZHENG Ji-hong^{1,2*}

(1. School of Optical-Electrical and Computer Engineering,

University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

2. Shanghai Key Lab of Modern Optical System,

University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: In this paper, a flexible curved holographic grating is fabricated by wrapping a polymer dispersed liquid crystal film in a polyethylene terephthalate (PET) film with a fixed radius of curvature, and using plane wave interference holographic technology. The article studies the diffraction and reproduction characteristics of flexible curved holographic gratings. The article use the microelement method and coupled wave theory to derive the diffraction characteristic formula of the curved flexible grating when the curvature changes. A flexible holographic grating with a cylindrical wave to reproduce the curvature change is proposed to achieve the best reproduction of the diffraction effect. The paper deduces the relevant technical parameters, such as the focal position of the cylindrical wave, the focal length of the cylindrical lens and the relationship between the lateral magnification of diffraction and so on. A flexible grating with a central diffraction efficiency of 88% was prepared under the conditions

收稿日期: 2020-07-10; 修订日期: 2020-09-11.

基金项目: 国家自然科学基金(No. 61975122)

Supported by National Natural Science Foundation of China(No. 61975122)

* 通信联系人, E-mail: jihongzheng@usst.edu.cn

of an exposure time of 70 s and an exposure intensity of $30 \text{ mW}/\text{cm}^2$. The experiment achieved the theoretically calculated lateral magnification characteristics by changing the radius of curvature of the flexible grating and using cylindrical wave reproduction.

Key words: polymer dispersed liquid crystal; flexible grating; diffraction efficiency; diffraction characteristics

1 引言

现在主流光栅的面型大部分采用平面或者固定曲率半径的曲面为基板,对于曲面半径可变化的柔性曲面光栅鲜有报道。柔性光栅通常指的是采用特殊柔性基片材料(如 PET 软膜、PDMS 弹性高分子材料、柔性可穿戴设备等)制备,可以通过改变不同曲率来实现曲面面型的变化。记录时会造成光栅周期在一定的范围内按照一定规律发生连续变化,而这种周期可变的光栅^[1-2]可以应用于球面单色仪^[3]、X 射线光谱仪^[4]、光学位移传感器^[5]等设计。柔性全息光栅拥有较高的衍射效率且制作工艺简单,柔性光栅在制作过程中使用更为轻薄的 PET 薄膜作为基底材料,相比较 ITO 玻璃基底,器件将会变得更薄更轻。文献[1]中将平面基片上的光栅结构转移到弹性高分子材料上来同时实现透射和衍射的功能,但文章中所描述的制备方法比较复杂。此外,在柔性曲面上使用激光刻划全息图如文献[6]所示,但所制备的光栅条纹周期等较多受到激光刻划工艺的限制。全息柔性光栅的制备与激光直写相比,该光栅制造简单、成本低、光槽密度高、可以避免鬼线的产生,且光栅可以通过改变半径来调控光栅周期分布。本实验中采用轻薄的柔性基底材料全息干涉制备光栅,优点在于由于曲率可变,全息衍射特性可变,能够有效避免激光直写等产生的误差。

本文提出并使用全息光路制作柔性曲面光栅,采用纳米银掺杂的聚合物分散液晶(PDLC)^[7-12]材料一次性曝光来制作柔性光栅,并研究了这种柔性光栅的特性,该光栅可以通过改变 PET 软膜曲率半径发生光学衍射特性的变化。这种全息柔性光栅在全息存储^[6]、光谱仪、软机器人^[13]、传感器、近眼显示^[7,14-15]等领域有着潜在的应用。

2 基本原理

2.1 干涉特性

图 1 是实验制备光路图,采用平面波对称式全息干涉光路制备,将液晶盒固定弯曲成一定曲率并固定在干涉光路中曝光。两束相干性高、强度相等、偏振态相同的激光光束干涉时会形成亮条纹和暗条纹交替出现的周期性结构,由于 PDLC 材料中聚合物基质的光聚合特性,预聚物在亮条纹处发生聚合反应,因为分子的扩散特性,液晶微滴由此向着暗条纹处聚集,随着时间的推移,逐渐形成了对应亮条纹和暗条纹的聚合物区和液晶区,由于二者的折射率不同,因此位相型全息光栅结构就此形成。由于曲面和平面在干涉场内的受照条纹分布规律有较大的差异,有必要研究曲面的 PDLC 光栅的干涉衍射特性。

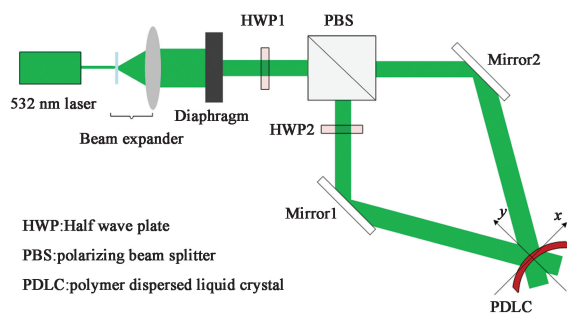


图 1 全息实验光路

Fig.1 Experimental holographic optical path

由于光栅的厚度远远小于光栅的表面尺寸,光栅厚度忽略不计,简化为弧型线,以光栅曲面中心点为原点建立平面坐标系,连接曲面中心和圆心为 y 轴,光栅曲面的切平面为 x 轴, R 为曝光时光栅的曝光半径。如图 2 所示,(a)和(b)为不同视角的侧视图,(c)为曲面光栅的俯视图坐标系。

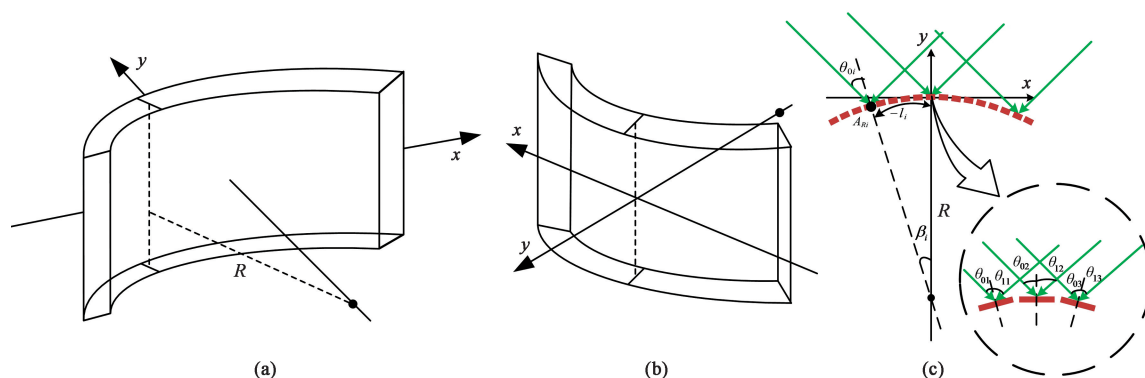


图2 (a)、(b)分别为不同视角的立体图,(c)为微元化的光栅。

Fig.2 (a) and (b) are three-dimensional images with different viewing angles, and (c) are micro-element gratings.

曲面在 y 轴方向提供了一定的深度,光栅周期的分布与平面光栅有一定的差异。通过微元法将曲面分割成无数个微平面,这就相当于无数个微小平面在同一个光场中曝光且每个微小平面在半径为 R 的柱面上进行排列,俯视图如图 2(c) 所示。

当一个微平面 H-PDLC 材料在平面波干涉光场中曝光时,每一个平面所制成的光栅都符合光栅方程,其中第 i 个微元光栅满足:

$$d_i (\sin\theta_{0i} + \sin\theta_{1i}) = m\lambda, \quad (1)$$

$$\theta_{0i} + \theta_{1i} = 2\alpha, \quad (2)$$

其中: d_i 、 θ_{0i} 、 θ_{1i} 、 m 、 λ 、 α 分别为对应了第 i 个微平面所对应的光栅周期、法线左侧入射光的入射角、法线右侧入射光的入射角、衍射级次、入射光的波长、曝光时两个干涉臂的半夹角。

根据图 2(c) 的几何关系,可以得到:

$$\beta_i = \frac{l_i}{R}, \quad (3)$$

$$\theta_{0i} = \alpha + \frac{l_i}{R}. \quad (4)$$

图 2(c) 中 l_i 表示微平面上的点 A_{Ri} 到坐标轴原点弧长,当 A_{Ri} 点在 y 轴左侧时, l_i 取负号,在 y 轴右侧时,取正号。同样,当点 A_{Ri} 在 y 轴左侧时, β_i 取负号,在 y 轴右侧时, β_i 取正号。

将上述公式(1)~(4)整合可得:

$$2d_i \sin\alpha \cos\left(\frac{l_i}{R}\right) = m\lambda, \quad (5)$$

对于曲面光栅,其光栅方程可以近似表达为:

$$2d \sin\alpha \cos\left(\frac{l}{R}\right) = m\lambda, \quad (6)$$

其中: d 为光栅的周期, l 表示光栅面上的点到坐

标轴原点弧长(本文用来表示入射点位置),当点在 y 轴左侧时, l 取负号,在 y 轴右侧时,取正号。从公式(6)中可以看出曲面光栅的周期与曝光夹角 α 、弧长 l 、曝光时的波长 λ 、曲面半径 R (曝光半径)有关。

2.2 柔性光栅的衍射场分析

当不改变光栅的曲率半径时,即(衍射半径) $R_1 = R$,入射光为平面波,所有光栅上的微元平面均遵循全息再现过程,衍射波为平面波。

当改变光栅的曲率半径时,即 $R_1 \neq R$,圆弧面限制了每个微平面的法线方向。当 R_1 变化时圆弧面也随之变形,其限制的微平面的法线方向一直指向 R_1 变化后对应的圆心,光栅不再保持半径为 R 时的光学特性。这时使用平面波照射光栅,衍射光斑上将出现明暗相间不均匀分布的“黑线”。为了得到更好的衍射效果,本文在理想再现情况下分析其衍射特性。

当光线照射在微平面上时,只有当入射角满足布拉格入射角 θ_{0i} 时,衍射效率才会最大(原光路再现)。通过图 3(b) 几何关系,可以推导出每个微元光栅达到最佳衍射时的入射光的光线表达式。并通过公式(4)转换成 y 与位置 l 有关的表达式(7):

$$y = \frac{x}{\tan\left(\frac{l}{R_1} - \theta_0\right)} + R_1 \left[\cos\frac{l}{R_1} - 1 - \frac{\sin\frac{l}{R_1}}{\tan\left(\frac{l}{R_1} - \theta_0\right)} \right]. \quad (7)$$

对最佳入射光线方程(7)的分析,当半径 $R_1 = R$ 时,原光路再现,采用平行入射光线,可获得最佳衍射图像,示意图如图 3(c2)。当 $R_1 \neq R$,

也就是曲面光栅压缩或者展开曲率时,其最佳入射光线轨迹将会聚于一点,也就是需要用发散或者会聚的柱面波再现才能获得最佳衍射图像,示

意图如图 3(c1)、(c3)所示。图中 $R_{1\text{decrease}}$ 、 R_{1R} 、 $R_{1\text{increase}}$ 分别表示 R_1 的数值相对于 R 的数值减小、相等、增加。

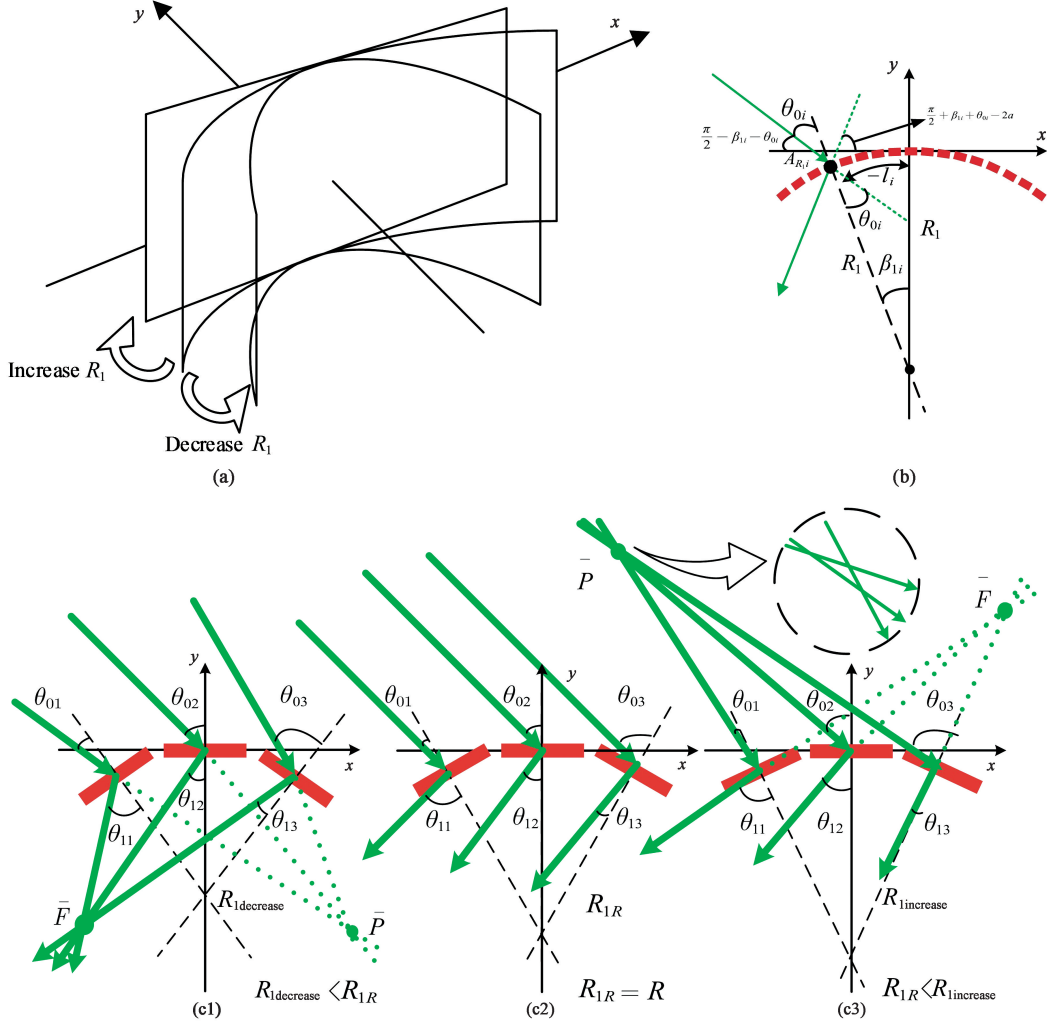


图 3 (a) R_1 变化的示意图; (b) 微元化的光栅; (c) 3 种情况下的衍射特性。

Fig.3 (a) Schematic diagram of the change of R_1 ; (b) Micro-element grating; (c) Diffraction characteristics in three cases.

为了找到会聚焦点的位置,本文对最佳入射光线进行追迹模拟,所有的入射光线在一片微小区域内两两相交,交点为 $P_i(x_{p_i}, y_{p_i})$ ($i = 1, 2, 3, \dots$)。如果一个柔性光栅由 3 个微平面组成,每个微平面有一条最佳入射光线,那么会有 3 条光线两两相交且只有 3 个交点 P_i ($i = 1, 2, 3$),如图 3(c3),图 3c(1)、(2)、(3)中每个交点处都有类似图 3(c3)的情况,出于作图空间限制,仅仅在图 3(c3)中画出。如果光栅有 q 个微平面,交点 P_i 有 $\frac{q(q-1)}{2}$ 个。为了让布拉格角偏移量影响更

小,选取微小交点区域的平均位置作为焦点。对于整个光栅, q 趋于无限大, $\bar{P}(x_p^-, y_p^-)$ 表示所有交点 P_i 集中位置的坐标。本文将 $\bar{P}$ 称为前(入射光)焦点。可以表示为:

$$\begin{cases} x_p^- = \lim_{q \rightarrow \infty} \frac{1}{q} \sum_{i=1}^q x_{p_i} \\ y_p^- = \lim_{q \rightarrow \infty} \frac{1}{q} \sum_{i=1}^q y_{p_i} \end{cases} \quad (8)$$

同理,通过图 3(b)的几何关系得出相对应的最佳衍射光的轨迹方程及后(衍射光)焦点 $\bar{F}(x_f^-, y_f^-)$

取平均坐标值,如公式(9)和公式(10)所示:

$$y = \frac{x}{\tan\left(2\alpha + \frac{l}{R_1} - \theta_0\right)} + R_1 \left[\cos \frac{l}{R_1} - 1 - \frac{\sin \frac{l}{R_1}}{\tan\left(2\alpha + \frac{l}{R_1} - \theta_0\right)} \right], \quad (9)$$

$$\begin{cases} \bar{x}_f = \lim_{q \rightarrow \infty} \frac{1}{q} \sum_{i=1}^q x_{fi} \\ \bar{y}_f = \lim_{q \rightarrow \infty} \frac{1}{q} \sum_{i=1}^q y_{fi} \end{cases}, \quad (10)$$

点 $\bar{F}(\bar{x}_f, \bar{y}_f)$ 表示光栅的后焦点。当 $R_1 < R$ 时,前焦点近似位于入射光线正向延长线的交点上,当 $R_1 > R$ 时,后焦点近似位于衍射光反向延长

线上,当 $R_1 = R$ 时,前焦点、后焦点位于无限远,示意图如图 3(c) 所示。

2.2.1 衍射效率分析

曲率半径不再保持为 R 时,使用柱面波照射微元光栅, $\bar{P}$ 点作为柱面波波源, $\bar{P}$ 是为了满足每一个微平面都有衍射光而被计算的,严格意义上又引入了入射光线与法线的夹角 θ 与原布拉格入射角 θ_0 失配。为了分析布拉格角失配对衍射效率的影响,本文依据耦合波理论^[16]推导微光栅的无吸收衍射效率:

$$v_i = \frac{\pi \Delta n d_1}{\lambda \sqrt{C_{Ri} C_{Si}}}, \quad (11)$$

$$C_{Si} = \cos \theta_i - \frac{\lambda}{d_i n} \cos \varphi_i, \quad (12)$$

$$\theta_i = \theta_{0i} + \Delta \theta_i, \quad (13)$$

$$\eta_i(l_i) = \frac{\sin^2 \sqrt{\left[\left(\theta_i - \alpha - \frac{l_i}{R} \right) \left(\frac{k_i d_1 \sin(\varphi_i - \theta_{0i})}{2 C_{Si}} \right) \right]^2 + v_i^2}}{1 + \left[\left(\theta_i - \alpha - \frac{l_i}{R} \right) \left(\frac{k_i d_1 \sin(\varphi_i - \theta_{0i})}{2 C_{Si}} \right) \right]^2 / v_i^2}, \quad (14)$$

此外将上式整理并求出整个衍射波的光强:

$$I = I_0 \int_{l_{\min}}^{l_{\max}} \eta(l) dl, \quad (15)$$

其中: $C_{Ri} = \cos \theta_i$, $k_i = \frac{2\pi}{d_i}$ 。 η_i 为微平面的衍射效率, n 为材料的平均折射率, Δn 为材料的折射率调制度, d_1 为光栅的厚度, λ 为入射光的波长, θ_i 为微平面上入射光与法线的夹角, θ_{0i} 为入射点的布拉格入射角, φ_i 为光栅矢量倾斜角, k_i 为微平面的波矢量, $l_{\max}$ 表示光栅面上弧长 l 的最大值, $l_{\min}$ 表示光栅面上弧长 l 的最小值。

公式(14)中光栅的衍射效率与光线入射时的

角度和光栅上微平面的位置 l 有关,布拉格角偏移量 $\Delta \theta$ 过大对光栅衍射效率会有影响。在不考虑材料内部吸收、材料表面反射等损耗时,可以推导出衍射光的总光强 I 的表达式(15), I_0 为总单个微元面入射光强。

通过 Matlab 模拟,将柱面镜的焦点与 $\bar{P}$ 点重合。 R_1 的值分别为 30, 70, 100, 200 mm, $R = 35$ mm, $\lambda = 532$ nm, $\alpha = 15^\circ$, $\Delta n = 0.03$, $n = 1.5315$, $d_1 = 0.025$ mm, $l_{\max} = 5$ mm, $l_{\min} = -5$ mm。从图 4(a)可以看出角度偏移量 $\Delta \theta$ 变化幅度很小,偏移量的最大绝对值不超过 0.3° ,不会引

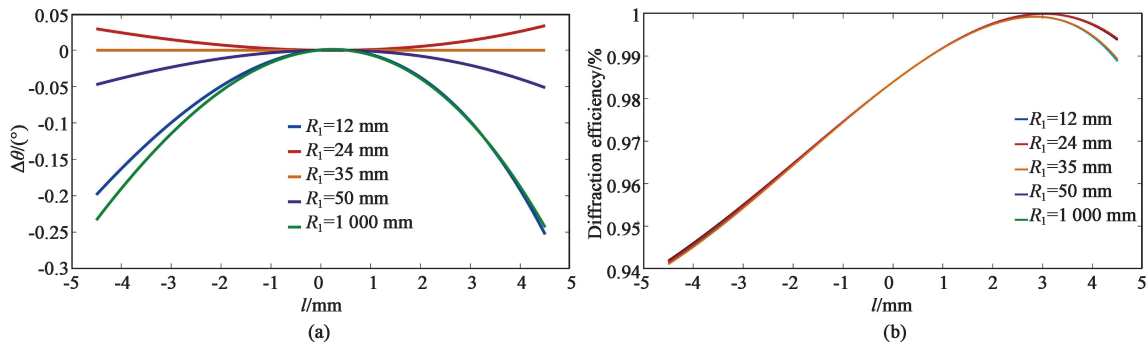


图4 不同 R_1 对应的角度偏移量(a)和衍射效率(b)

Fig.4 Different corresponding angular offset (a) and diffraction efficiency (b) for R_1

起衍射光斑分布不均匀的情况,从而避免了“黑线”的产生。图 4(b)验证了衍射效率在 94% 以上,不同的半径对应的衍射效率基本一致,光强分布基本趋于均匀。

2.2.2 柔性光栅的横向放大率

为了描述柔性光栅作为成像器件在光学系统中的放大作用,这里用横向像宽 L' 与柱透镜的横向通光口径 D 之比来定义系统的横向放大率。当使用柱面镜补偿还原光束时,只考虑照射在光栅上的光斑关于 y 轴对称,可以根据图 5 的几何关系导出一定距离后衍射光斑的横向尺寸。

通过以下几何关系可以得出结果:

$$\begin{cases} L' = 2L + (Z - R_1 + \sqrt{R_1^2 - L^2}) \left\{ \tan \left[\theta'_1 - \arcsin \left(\frac{L}{R_1} \right) \right] - \tan \left[\theta'_2 + \arcsin \left(\frac{L}{R_1} \right) \right] \right\} & R \neq R_1 \\ L' = \frac{D}{\cos \alpha} & R = R_1 \end{cases}, \quad (16)$$

$$\arctan \left(\frac{y_p - \sqrt{R_1^2 - L^2} + R_1}{x_p - L} \right) - \arctan \left(\frac{y_p - \sqrt{R_1^2 - L^2} + R_1}{x_p + L} \right) = \pm 2 \arctan \left(\frac{D}{2f} \right), \quad (17)$$

$$\beta_x = \frac{L'}{D}, \quad (18)$$

其中: $l_2 = -l_1 = R_1 \arcsin \frac{L}{R_1}$, $\theta'_2 = \alpha - \frac{l_2}{R}$, $\theta'_1 = \alpha - \frac{l_1}{R}$ 。 L 为光栅上受照的横向尺寸,即 A 点的横坐标, Z 为圆弧的顶点到像面的距离, L' 为像面衍射光斑的横向尺寸, θ'_1 为 A 处的布拉格衍射角, θ'_2 为 B 处的布拉格衍射角, D 为激光光束的尺寸, f 为柱透镜的焦距, l_1 为 A 的位置, l_2 为 B 的位置, β_x 为横向放大倍率。当 $R_1 > R$ 时,式 (17) 等号右侧取“+”, $R_1 < R$ 时,取“-”。 $L' < 0$, 表示衍射光束有汇聚现象, $R_1 = R$ 时候表示衍射光是平面波。公式 (17) 允许通过可测量 D 、已知量 f 和前焦点的位置直接推出光栅受照面的尺寸 L ,也可以直接测量出 L 再代入公式 (16) 得出衍射光的横向尺寸。

通过 Matlab 模拟,其中参数设置 $Z = 120$ mm, $D = 3$ mm, $\alpha = \frac{\pi}{12}$, f 分别为 100 mm 和 450 mm。通过式 (16)、(17) 可以看出,光斑缩放尺寸除了与 D 有关外,还和 R 、 R_1 、 Z 有关。

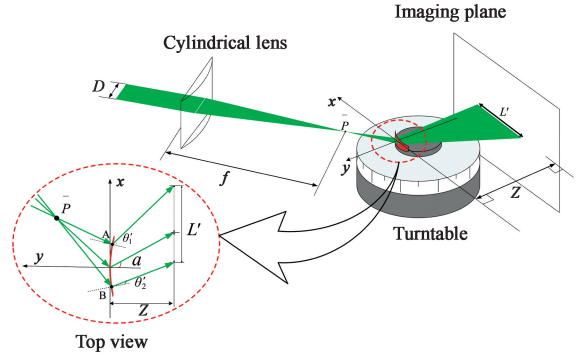


图 5 物光再现示意图

Fig.5 Object information reproduction

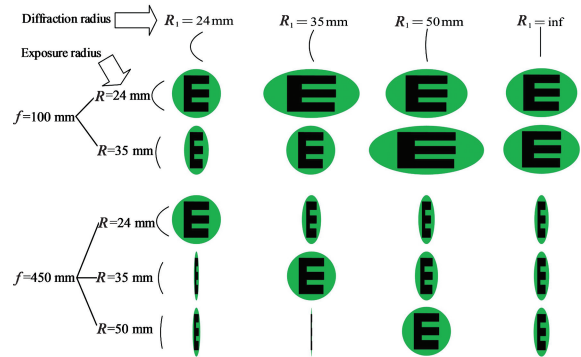


图 6 衍射光斑尺寸

Fig.6 Diffraction spot size

3 实验验证

为了验证理论的可行性,本节通过对光栅的周期、衍射效率,以及放大倍率进行实验分析。图 1 显示了制备对称变间距光栅的实验示意图,图中选择波长为 532 nm 的激光作为光源,激光光束经过扩束器扩束后,再经过孔径光阑并控制直径为 1 cm,之后激光光束经过两片半波片和偏振分光棱镜在光束叠加区域形成干涉。曝光时,在光束叠加的区域放置柱面柔性材料使光栅成形。

其中半夹角 α 设置为 15° , R 分别设置为 12, 24, 35, 50 mm。

当极细的光束入射光栅时,入射上区域可以近似看成平面光栅。通过公式(1)可以得出:在衍射角、入射角以及波长被确定后,就可以得出每个点所在周期。将光栅固定在旋转台上使用直径 2 mm 左右的 532 nm 的激光在光栅上约 $-10 \sim 10$ mm 的区域移动照射,通过测量照射点最高衍射效率对应的入射角和衍射角,得出光栅的周期。如图 7,光栅周期分布规律与公式基本吻合。

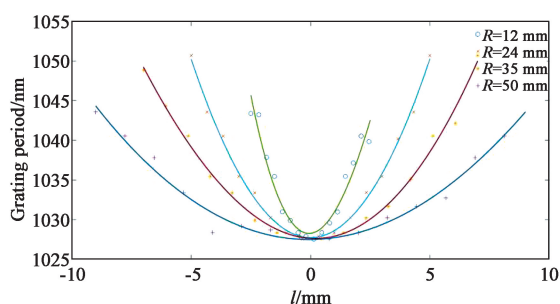


图7 不同半径对应的周期拟合曲线

Fig. 7 Period fitting curves corresponding to different radii

选取半径 R 为 24 mm 的光栅,将光栅完全展平后,测得其有效直径约为 12 mm,有效面积约为 113 mm^2 。当 l 为 0 mm(光栅中心点)和 5 mm(距离中心点右侧 5 mm 处)时,其对应的理论周期为 1 027.7 nm 和 1 050.5 nm。将实验制备好的光栅样品用液氮迅速冷却,打开样品基板,用乙醇浸泡 12 h,待液晶完全溶解后烘干。我们在光栅表面选取两个点验证光栅的周期并通过原子力显微镜(AFM)测量光栅周期。如图 8 所示,周期测量值和理论值吻合得比较好。

在实验中,衍射光的能量几乎完全集中到+1级上,由计算公式 $\eta = \frac{I_1}{I_1 + I_2}$,确定实验中光栅

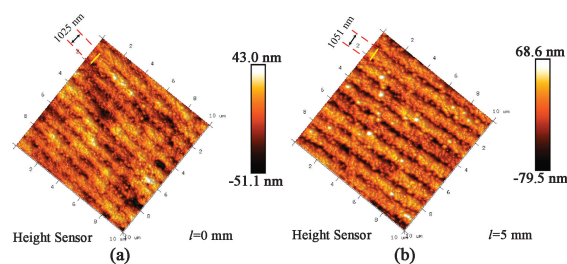


图8 (a)、(b)为不同半径对应的原子力显微镜微观结构图。

Fig.8 (a) and (b) are the atomic force microscope microstructure diagrams corresponding to different radii

的衍射效率。其中 I_1 、 I_2 分别表示一级光强、零级光强。将制作好的光栅弯曲成不同的曲率并用细光束来照射光栅中心来测试衍射效率,对于弯曲成不同的半径的光栅,它的衍射效率受曲率影响不大,基本保持在 88% 以上,如图 9 所示。由于实验过程中受到如入射光的吸收率、反射率等因素的影响,导致实际衍射效率比理论模拟值减少约 10%。

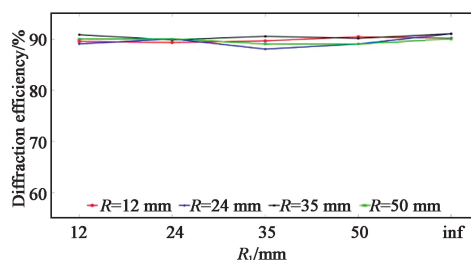


图9 衍射效率与半径 R_1 、 R 的关系。

Fig. 9 Relationship between diffraction efficiency and radius R_1 , R .

使用宽光束来照射光栅,在光路里放置柱透镜,柱透镜的焦点与 $\bar{P}(x_p^-, y_p^-)$ 重合,通过计算得出前焦点 $\bar{P}(x_p^-, y_p^-)$,如表 1 所示。

表1 前焦点坐标位置

Tab.1 Front focus coordinate position

R_1	24 mm	35 mm	50 mm	Infinity
$R = 24 \text{ mm}$	(Infinity, Infinity)	(-18.96, 70.77)	(-11.45, 42.74)	(-5.92, 22.11)
$R = 35 \text{ mm}$	(19.03, -71.04)	(Infinity, Infinity)	(-28.97, 108.11)	(-8.65, 32.27)
$R = 50 \text{ mm}$	(11.54, -43.08)	(29.14, -108.51)	(Infinity, Infinity)	(-12.35, 46.09)

根据给出的前焦点将光栅放置在合理位置给出实际效果图,接收屏在光栅后方 $Z = 120\text{ mm}$ 处,通光口径 $D = 3\text{ mm}$,分别使用焦距 f 为 100 mm 和 450 mm 的柱透镜,实验光路图如图 5,效果如图 10 所示。

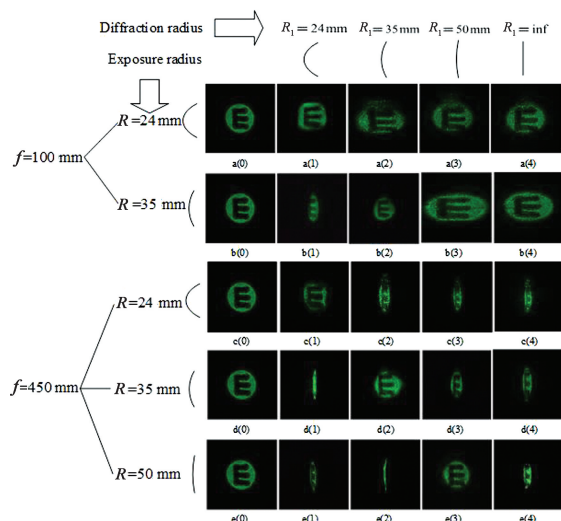


图 10 实验效果图

Fig.10 Experimental effect diagram

图 10 中(a0)、(b0)、(c0)、(d0)、(e0)为原始图像,(a1)、(b1)、(c1)、(d1)、(e1)为半径 $R_1 = 24\text{ mm}$ 的光栅成像光斑,(a2)、(b2)、(c2)、(d2)、(e2)为半径 $R_1 = 35\text{ mm}$ 的光栅成像光斑,(a3)、(c3)、(e3)、(d3)为半径 $R_1 = 50\text{ mm}$ 的光栅成像光斑,(a4)、(b4)、(c4)、(d4)、(e4)为 R_1 为无

限大时光栅成像光斑。当 $R_1 > R$ 时,能起到扩大作用,当 $R_1 < R$ 时,光栅拥有类似于柱面镜聚焦的作用,图中却没有显示这样的特征。这是因为柱透镜的焦距固定,随着 R_1 的变化,前焦点的位置也随着改变即前焦点到光栅顶点的距离改变,光栅的受照面积也随着改变。如果光栅的受照面积固定,当 $R_1 > R$ 时,随着 R_1 的增大,像斑横向尺寸可以无限增大,当 $R_1 < R$ 时,接收屏距离光栅后焦点越近,光斑的横向尺寸越小。将图 10 和图 6 对比,可以发现图像变化规律基本保持一致。由于掺杂纳米银的 PDLC 并没有进行表面修饰,导致图中的光栅的衍射效果并没有那么理想。

4 结 论

该文章通过微元法推导了光栅具有连续变化的对称式周期。为了得到更好的成像质量,本文提出了使用柱透镜对光栅进行补偿以提高亮度均匀性。随后根据耦合波理论推导了不同曲率面型条件下的衍射效率,此外还推导了不同曲率面型下光栅的横向放大率和焦点位置。实验中,本文测得的周期分布与理论吻合得较好,并且曲面柔性光栅具有较高的衍射效率,中心衍射效率约为 88% 。最后验证了柱透镜的焦距以及证明了灵活控制光栅衍射视场场大小的可行性。

参 考 文 献:

- [1] 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.
- [2] WANG K N, ZHENG J H, LU F Y, *et al.* Varied-line-spacing switchable holographic grating using polymer-dispersed liquid crystal [J]. *Applied Optics*, 2016, 55(18): 4952-4957.
- [3] XIE Y J, XU X D, HONG Y L, *et al.* Fabrication of varied-line-spacing grating by elastic medium [J]. *Optics Express*, 2004, 12(17): 3894-3899.
- [4] STROCOV V N, SCHMITT T, FLECHSIG U, *et al.* Numerical optimization of spherical variable-line-spacing grating X-ray spectrometers [J]. *Journal of Synchrotron Radiation*, 2011, 18(2): 134-142.
- [5] LOU J, FU S J, XU X D, *et al.* Design and fabrication of holographic variable line-spacing gratings for position sensor [J]. *Acta Physica Sinica*, 2006, 55(12): 6405-6409.
- [6] KANG R D, LIU J A, XUE G L, *et al.* Curved multiplexing computer-generated hologram for 3D holographic display [J]. *Optics Express*, 2019, 27(10): 14369-14380.
- [7] SHEN T, CAI Z X, LIU Y R, *et al.* Switchable pupil expansion propagation using orthogonal superposition varied-line-spacing H-PDLC gratings in a holographic waveguide system [J]. *Applied Optics*, 2019, 58(24): 6622-6628.

- [8] BUNNING T J, NATARAJAN L V, TONDIGLIA V P, *et al.* Holographic polymer-dispersed liquid crystals (H-PDLCs) [J]. *Annual Review of Materials Science*, 2000, 30(1): 83-115.
- [9] LIU Y J, SUN X W. Holographic polymer-dispersed liquid crystals: materials, formation, and applications [J]. *Advances in OptoElectronics*, 2008, 2008: 684349.
- [10] BRONNIKOV S, KOSTROMIN S, ZUEV V. Polymer-dispersed liquid crystals: progress in preparation, investigation, and application [J]. *Journal of Macromolecular Science-Physics*, 2013, 52(12): 1718-1735.
- [11] 王康妮. 纳米银掺杂的全息聚合物分散液晶光栅及其立体显示技术研究[D]. 上海: 上海理工大学, 2017: 1-95.
WANG K N. Holographic polymer-dispersed liquid crystal grating doped with silver nanoparticle and its application to autostereoscopic display [D]. Shanghai: University of Shanghai for Science and Technology, 2017: 1-95. (in Chinese)
- [12] 桂坤, 郑继红, 王雅楠, 等. 连续变焦的聚合物分散液晶电控透镜[J]. 光子学报, 2014, 43(4): 423005.
GUI K, ZHENG J H, WANG Y N, *et al.* Electrically controlled continuously focusing lens based on polymer dispersed liquid crystal [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, 43(4): 423005. (in Chinese)
- [13] YIN K, LEE Y H, HE Z Q, *et al.* Stretchable, flexible, rollable, and adherable polarization volume grating film [J]. *Optics Express*, 2019, 27(4): 5814-5823.
- [14] 刘正周, 廖敦明, 贾永臻, 等. 可折叠 OLED 屏幕的弯折应力仿真[J]. 液晶与显示, 2018, 33(7): 555-560.
LIU Z Z, LIAO D M, JIA Y Z, *et al.* Stress simulation of foldable OLED screen bending [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2018, 33(7): 555-560. (in Chinese)
- [15] 冯魏良, 黄培. 柔性显示衬底的研究及进展[J]. 液晶与显示, 2012, 27(5): 599-607.
FENG W L, HUANG P. Advances in flexible displays substrates [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2012, 27(5): 599-607. (in Chinese)
- [16] 胡静. 基于体布拉格光栅横模选择特性理论研究[D]. 苏州: 苏州大学, 2016: 24-25.
HU J. Theoretical study of transverse mode selection in laser resonator with volume bragg gratings [D]. Suzhou: Soochow University, 2016: 24-25. (in Chinese)

作者简介:



李鹏飞(1995—),男,江苏南通人,硕士研究生,2018年于常州工学院获得学士学位,主要从事全息光栅的研究。E-mail: 624534907@qq.com



郑继红(1975—),女,安徽怀宁人,博士,教授,2003年于上海理工大学获得博士学位,主要从事聚合物分散液晶和信息光学方面的研究。E-mail: jihongzheng@usst.edu.cn