

doi:10.3788/gzxb20144309.0923003

一种聚合物分散液晶菲涅尔波带片

何如双¹, 张斌¹, 王振宇¹, 陶卫东¹, 潘雪丰¹, 董建峰²

(1 宁波大学 理学院微电子科学与工程系和光学研究所, 浙江 宁波 315211)

(2 宁波大学 信息科学与工程学院, 浙江 宁波 315211)

摘要:利用波长为 800 nm, 脉宽 130 fs 的飞秒激光在镀铝膜的玻璃基片上刻蚀出波带环图案, 然后用溶致相分离法将其制备成聚合物分散液晶菲涅尔波带片. 用波长为 632 nm 的 He-Ne 激光对聚合物分散液晶菲涅尔波带片进行测试, 结果表明: 随着电压的增加该样品具有良好的光电可控性, 可以实现对焦点光强的调控. 在沿光轴方向上, 测试到的主焦点位置与理论计算值相差小于 5%, 且聚合物分散液晶菲涅尔波带片在 160 V 电压时衍射效率为 10.4%, 接近理论衍射效率 12.1%, 表明了该设计的可行性.

关键词:波带片; 液晶; 光电可控; 理论值; 激光加工

中图分类号: O439

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2014)09-0923003-4

A Polymer Dispersed Liquid Crystal Fresnel Zone Plate

HE Ru-shuang¹, ZHANG Bin¹, WANG Zhen-yu¹, TAO Wei-dong¹,
PAN Xue-fen¹, DONG Jian-feng²

(1 Department of Microelectric Science and Engineering, Institute of Optics, Faculty of Science,
Ningbo University, Ningbo, Zhejiang 315211, China)

(2 College of Information Science and Engineering, Ningbo University, Ningbo, Zhejiang 315211, China)

Abstract: A wave band ring pattern was fabricated by femtosecond laser on a glass substrate which was plated with aluminum, the wavelength of the laser was 800 nm, and the width of pulse was 130 fs. The solvent system phase separation preparation was used to manufacture a polymer dispersed liquid crystal Fresnel zone plate. By the He-Ne laser, the properties of the zone plate was tested. The results show that the sample has good photoelectric regulation properties with the increasing voltage, the intensity of the focal point is able to be adjusted. Meanwhile, along the direction of optical axis, the difference between the location of the main focal point and its theoretical value is less than 5%, and the diffraction efficiency of the polymer dispersed liquid crystal Fresnel zone plate is 10.4% with the voltage is 160 V, which is close to the theoretical value of 12.1%. The results prove this design to be feasible.

Key words: Zone plate; Liquid crystals; Photoelectricity; Theory; Laser beam machining

OCIS Codes: 220.3630; 230.0250; 220.4241

0 引言

菲涅尔波带片作为一种重要的光学元件, 具有普通透镜无法比拟的优点, 在远程通讯、测距、以及红外和紫外成像方面都受到越来越多的重视. 由于波带片可以起到透镜和分光器的作用, 所以在一些复杂的光学仪器中得到广泛应用. 随着近年来光学微加工技术

的快速发展, 设计制备各类微纳光电子器件已经成为当前研究和应用的一个重要方向^[1-7], 各种性能先进的波带片也不断被设计出来. Hongwen Ren 等基于掩模板, 使用纳米级的聚合物分散液晶, 制备出了一种效率高达 39% 的相位型菲涅尔波带片^[8]; Yun-Hsing Fan 等使用电子束刻蚀技术, 结合分散液晶, 制备出了一种衍射效率较高的菲涅尔波带片^[9]. 由于飞秒激光在加

基金项目: 国家自然科学基金(No. 61078060)资助

第一作者: 何如双(1989-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为光纤光栅传感技术. Email: rshuanghe@sina.cn

导师(通讯作者): 陶卫东(1969-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为光纤光栅与飞秒激光微加工技术. Email: taoweidong@nbu.edu.cn

收稿日期: 2014-01-22; 录用日期: 2014-03-10

<http://www.photon.ac.cn>

工过程中热效应小、准确度高、加工速度快,本文将利用飞秒激光在镀铝膜的玻璃基片上刻蚀出微米级的菲涅尔环形图案,采用溶制相分离法^[10-13]将该样品制成聚合物分散液晶菲涅尔波带片,并对其进行测试。

1 实验原理

聚合物分散液晶菲涅尔波带片由两块平行电极与聚合物分散液晶制作而成,其中一电极为氧化钢锡(ITO)导电玻璃,另一电极为刻有菲涅尔波带片的镀铝膜玻璃基片。如果聚合物分散液晶薄膜层的厚度足够,当两极板上无外加电压时,液晶分子处于无序状态排列,呈不透明状态;当有外加电压后,两电极之间的电场和液晶分子的排列如图1,在奇数波带与偶数波带的边缘处,电场的分布不再均匀,会使无铝膜处也产生电场^[14]。图1为聚合物分散液晶菲涅尔波带片在加上电场之后的模型。

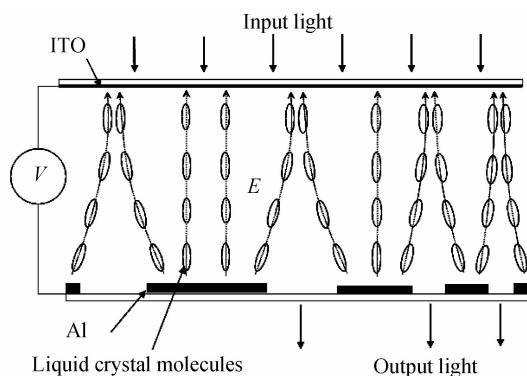


图1 电场下的液晶分子

Fig. 1 Liquid crystal molecules under electric field

由聚合物分散液晶的特性可知,通过调节外加电压,可改变液晶分子的有效折射率 n_{eff} ,使其与聚合物的折射率 n_p 相匹配。在电场开关作用下聚合物分散液晶会显示出透射与散射两种状态^[13],从而实现菲涅尔波带片焦点处光强的可控。

对于振幅型菲涅尔波带片各级的衍射光强可以根据傅里叶展开法来求取,按照 Attwood D. T. 的方法^[15],可以得到

$$I_m = \left[\frac{1}{\pi} \int_0^{\pi/2} \cos(mu) du \right]^2 I_0 = \frac{\sin^2(m\pi/2)}{(m\pi)^2} I_0 = \frac{1}{(m\pi)^2} I_0 \quad (1)$$

式中 $1/(m\pi)^2$ 为波带片各级的衍射效率 η_m ,且 m 为奇数。则整个菲涅尔波带片的衍射效率可表示为

$$\eta = \sum \eta_m = \sum_{m=1}^n \left(\frac{1}{m\pi} \right)^2 \quad (2)$$

2 器件制备

先将一块玻璃基底用体积比为 1:1 的乙醇和氨水混合溶液清洗 5 min,烘干后置于真空镀膜机上镀上

一层厚约 500 nm 的铝膜。然后将镀铝膜的玻璃基片放在如图 2 所示的装置下,用飞秒激光 (Coherent Mira-900, 波长 800 nm, 能量 1.8 W) 进行刻蚀,在玻璃基底的铝膜上制备出如图 3 的菲涅尔波带片。其最内层的半径 $r_1 = 700 \mu\text{m}$,第 n 个环的半径满足关系 $r_n^2 = n_1 r_1^2$ (n 指环带个数)。制备出的菲涅尔波带片半径大小为 $r = 2.8 \text{ mm}$ ($n = 16$),且有 8 个透光波带。在刻蚀之前,用一直径为 $120 \mu\text{m}$ 的铜丝穿过圆心,可以让被遮挡部分的铝膜不被激光刻蚀,使未刻蚀环带由一细线状的铝膜相连接,形成一个导电整体,如图 3。

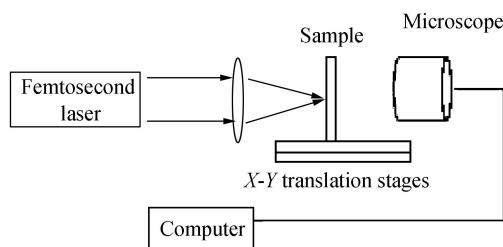


图2 制备菲涅尔波带片的装置

Fig. 2 The Fresnel zone plate preparation device

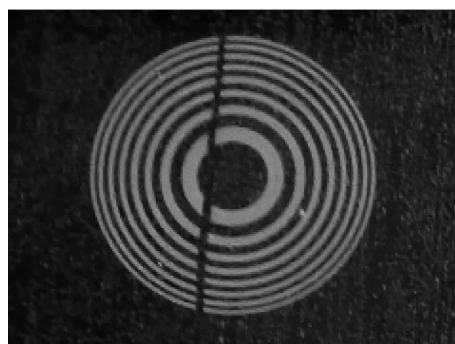


图3 菲涅尔波带片样品

Fig. 3 The sample of Fresnel zone plate

将 ITO 玻璃切割成与玻璃基片相同大小,然后用 1:1 的乙醇和氨水混合溶液洗净、风干。同时,取液晶 (TEB30A) 和紫外胶 (BBC UV GLUE 102) 以 1:1 的体积比混合,静置 10 min。待混合溶液内部无气泡之后,用胶头滴管取少量的混合溶液滴在载玻片的铝膜上,并使其完全覆盖菲涅尔波带片。之后将 ITO 玻璃的导电面和载玻片上的铝膜相对,覆盖在载玻片上,如图 4,放在紫外光下曝光 5 min,固化后得到样品,其中

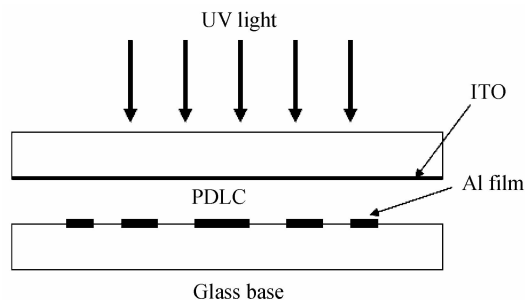


图4 可控菲涅尔波带片的制备

Fig. 4 The preparation of controllable Fresnel zone plate

聚合物分散液晶薄膜的厚度约为 $45\ \mu\text{m}$ 。

3 测试光路及方法

为判定该菲涅尔波带片的焦距,实验中采用如图 5 所示装置.用 He-Ne 激光器发出的 $632\ \text{nm}$ 的光,经偏振棱镜调节光强后经过一组透镜,扩束成为平行光.再用直径为 $1\ \text{cm}$ 的光阑取其中心光束,使光束垂直照射于聚合物分散液晶菲涅尔波带片,且使波带环区域完全被光束覆盖.再在聚合物分散液晶菲涅尔波带片的两极上加 $100\ \text{V}$ 交流电压,使其呈透光状态,然后在聚合物分散液晶菲涅尔波带片的光轴方向上放置光探头,用斩波器和锁相放大器(NF corporation)组合装置读取相应的光强度.因为焦距前后光强差距不是十分明显,所以在测试焦距时,在波带片后 $60\sim 115\ \text{cm}$ 的范围内沿焦点的光轴方向上依次增加光探头的距离,每隔 $5\ \text{cm}$ 读取光强度.

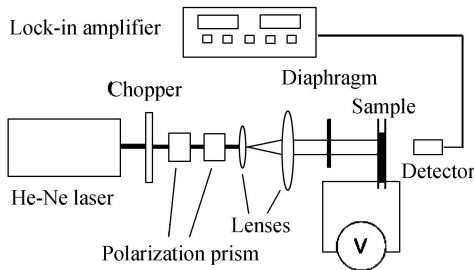


图 5 测试光路

Fig. 5 Schematic diagram of experimental light path

基于图 5 装置,在测得的实际焦点位置处改用光纤探头,且光纤探头与光纤光谱仪(Ocean Optics USB4000)相连,光谱仪与电脑相连.因聚合物分散液晶在 $150\ \text{V}$ 以后透光性随电压变化不明显,且易被击穿损坏,所以测试时在 $0\sim 160\ \text{V}$ 内依次调节外加电压的大小,测试聚合物分散液晶菲涅尔波带片在不同电压下的透射光谱.

4 结果与分析

利用图 4 装置,测得沿光轴方向上光强度与聚合物分散液晶菲涅尔波带片的相对位置关系如图 5.

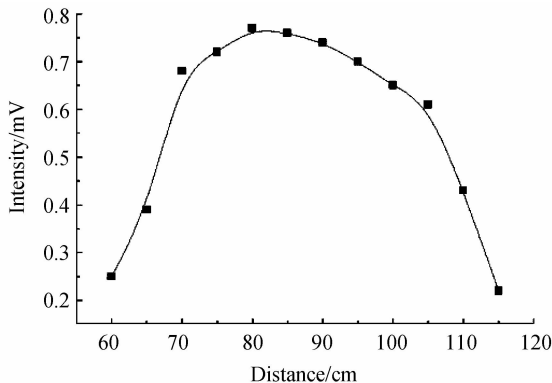


图 6 $100\ \text{V}$ 电压下,光轴方向上光强与相对距离的关系
Fig. 6 The optical axis direction glazing strong relationship with the relative distance when the voltage is $100\ \text{V}$

由图 6 可知聚合物分散液晶菲涅尔波带片的主焦点位于其后方约 $80\ \text{cm}$ 处,这与根据式(3)计算出来的焦点 $77.7\ \text{cm}$ 的相对误差为 2.9% 。

$$f = \frac{r_n^2}{n\lambda} \quad (3)$$

根据聚合物分散液晶材料的特性,它在电场的作用下显示出透光状态,且透射光强度随电场的增大而增加,因而实现了控制焦点处光强的目的.对聚合物分散液晶菲涅尔波带片焦点处的光强随电压变化关系进行测试,结果如图 7 和图 8,可以看到光强随着电压的增加而增大,其变化呈明显的光电特性.

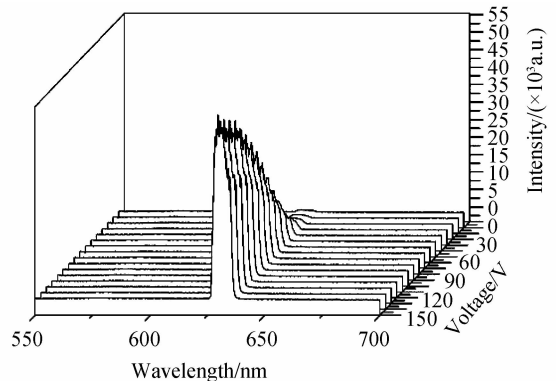


图 7 焦点处光强度随电压的变化

Fig. 7 Focus light intensity with the change of voltage

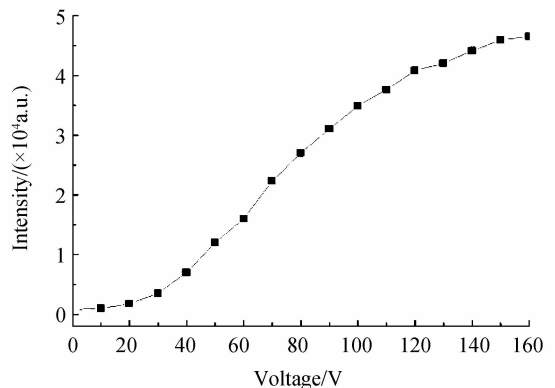


图 8 焦点处光强度与电压的关系

Fig. 8 Focus light intensity relationship with voltage

为了比较聚合物分散液晶菲涅尔波带片在焦点处的光斑质量,在聚合物分散液晶菲涅尔波带片后 $70\ \text{cm}$ 、 $80\ \text{cm}$ 、 $90\ \text{cm}$ 位置处用 CCD 相机拍摄光斑照片,然后读取灰度值得到图 9.可看出,在 $70\ \text{cm}$ 处,光斑面积较大,发散严重; $90\ \text{cm}$ 处光斑面积也较大,强度较低;在 $80\ \text{cm}$ 处,光斑面积小且强度高.

根据式(4)计算聚合物分散液晶菲涅尔波带片的实际衍射效率^[7]

$$\eta = \frac{P - P_0}{P_i} \quad (4)$$

式中, P 为焦点处激光功率, P_0 为噪音, P_i 为入射激光透射样品后的功率.实验测得聚合物分散液晶菲涅尔

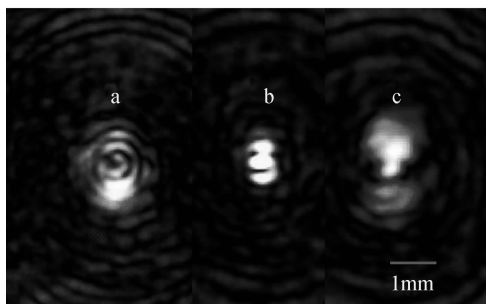


图9 衍射光斑($L_a=70$ cm, $L_b=80$ cm, $L_c=90$ cm)
Fig. 9 The diffraction spots($L_a=70$ cm, $L_b=80$ cm, $L_c=90$ cm)

波带片的衍射效率随着电压的变化而变化,如图10. 在160 V时,聚合物分散液晶菲涅尔波带片衍射效率最大,为10.4%,接近根据式(2)计算得到的理论衍射效率12.1%.

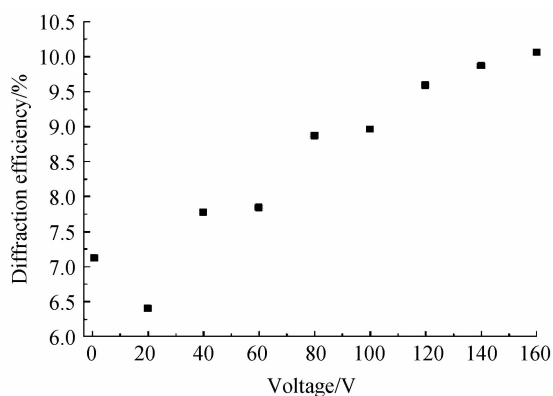


图10 衍射效率随电压的变化

Fig. 10 Voltage-dependent diffraction efficiency

5 结论

利用飞秒激光在微纳加工上的优势,在镀铝膜的玻璃基底上刻蚀出菲涅尔波带片,再制备成聚合物分散液晶菲涅尔波带片,并在 He-Ne 激光下研究其性能.结果表明,聚合物分散液晶菲涅尔波带片具有良好的光电特性,可以实现对焦点光强的调控.且经过测试和理论计算,实际焦距值与理论焦距值相差小于5%,在160 V电压下衍射效率为10.4%接近理论值12.1%,该方法简单易操作,具有一定的推广价值.

参考文献

[1] KOCH J, FADEVA E, ENGELBRECHL M, *et al.* Maskless nonlinear lithography with femtosecond laser pulses [J]. *Applied Physics A*, 2006, **82**(1): 23-26.
[2] BONSE J, HOHM S, ROSENFELD A, *et al.* Sub-100-nm laser-induced periodic surface structures upon irradiation of

titanium by Ti: sapphire femtosecond laser pulses in air[J]. *Applied Physics A*, 2013, **110**(3): 547-551.

- [3] DUAN Y, MCKAY A, JOVANOVIĆ N, *et al.* Theoretical modeling and experiments on a DBR waveguide laser fabricated by the femtosecond laser direct-write technique [J]. *Optics Express*, 2013, **21**(15): 17701-17710.
[4] HE Feng-tao, ZHOU Qiang, YUAN Wen-zheng, *et al.* Femtosecond laser multi-beam interference lithography anti-reflective microstructure on silicon [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **42**(5): 515-520.
贺锋涛, 周强, 杨文正, 等. 飞秒激光多光束干涉光刻硅表面减反微结构 [J]. *光子学报*, 2014, **42**(5): 515-520.
[5] ZHOU Zi-gang, LUO Chen, YANG Yong-jia, *et al.* Fabrication of 1×4 optical waveguide splitter by femtosecond laser in LiNbO₃ [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, **42**(4): 402-404.
罗自刚, 罗晨, 杨永佳, 等. 飞秒激光刻写 1×4 铌酸锂光波导功分器的研究 [J]. *光子学报*, 2013, **42**(4): 402-404.
[6] WANG Shi-jun, HUANG Yong-zhen. Eight-channel add-drop microring filters on SOL wafer [J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2010, **21**(8): 1125-1128.
王世君, 黄永箴. 基于 SOL 结构的 1×8 阵列上下微环滤波器 [J]. *光电子 • 激光*, 2010, **21**(8): 1125-1128.
[7] CHEN Bao-qin, ZHAO Min, WU Xuan, *et al.* Electron beam lithography application on the nanofabrication and nanodevice [J]. *Micronanoelectronic Technology*, 2008, **12**(45): 683-688.
陈宝钦, 赵珉, 吴璇, 等. 电子束光刻在纳米加工及器件制备中的应用 [J]. *微纳电子技术*, 2008, **12**(45): 683-688.
[8] REN H, FAN Y H, WU S T. Tunable Fresnel lens using nanoscale polymer-dispersed liquid crystals [J]. *Applied Physics Letters*, 2003, **83**(8): 1515-1517.
[9] FAN Y H, REN H, WU S T. Switchable Fresnel lens using polymer-stabilized liquid crystals [J]. *Optics Express*, 2003, **11**(23): 3080-3086.
[10] PATEL J S, RASTANI K. Electrically controlled polarization-independent liquid-crystal Fresnel lens arrays [J]. *Optics Letters*, 1991, **16**(7): 532-534.
[11] LIN L C, JAU HU, LIN T H, *et al.* Highly efficient and polarization-independent Fresnel lens based on dye-doped liquid crystal [J]. *Optics Express*, 2007, **15**(6): 2900-2906.
[12] TOSELLO G, HANSEN H N, GASPARIN S, *et al.* Surface wear of TiN coated nickel tool during the injection moulding of polymer micro Fresnel lens [J]. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 2012, **61**(1): 535-538.
[13] ZHAO Yun, PAN Xue-feng, DONG Jian-feng, *et al.* Study on electro-optical characteristics of the PDLC doped with Rhodamine 6G [J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2013, **24**(2): 287-291.
赵云, 潘雪丰, 董建峰, 等. 罗丹明 6G 掺杂 PDLC 的光电特性 [J]. *光电子 • 激光*, 2013, **24**(2): 287-291.
[14] HUAN W C, CHEN Y J, LIN C H, *et al.* Sensitive voltage-dependent diffraction of a liquid crystal Fresnel lens [J]. *Applied optics*, 2009, **48**(11): 2094-2098.
[15] ATTWOOD D T. 软 X 射线与极紫外辐射的原理和应用 [M]. 张杰, 等, 译, 北京: 科学出版社, 2003.