

文章编号 1004-924X(2016)增-0267-05

## 菲涅尔波带片及其在光学加速度 传感器中的应用

贾书海, 申鹏程, 汪永林\*, 董君, 王飞, 唐振华, 杜艳芬  
(西安交通大学机械工程学院, 陕西西安 710049)

**摘要:** 设计加工了一种菲涅尔波带片, 介绍了该菲涅尔波带片的设计原理和参数选择。该波带片的尺寸精度在微米级, 最大理论半径为  $494.19 \mu\text{m}$ , 最小理论半径为  $78.11 \mu\text{m}$ 。开发了该波带片的微纳加工工艺流程, 成功制备出了高质量的波带片。所加工的菲涅耳衍射波带片边界光滑完整, 具有良好的聚焦和成像特性。利用该波带片的衍射特性开发出了全光型的加速度传感器, 并对其传感特性进行了测试。从实测的输出曲线可以看出, 传感器输出和加速度之间有着良好的线性度, 灵敏度为  $0.033 \text{ V/g}$ 。该传感器利用光纤来导光, 传感器头内没有电子元件, 具有良好的抗电磁干扰能力, 可以应用于恶劣环境中。

**关键词:** 衍射器件; 波带片; 衍射特性; 微细加工; 加速度传感器

**中图分类号:** TN25; TP212 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20162413.0267

## Fresnel zone plate and its application in optical acceleration sensor

JIA Shu-hai, SHEN Peng-cheng, WANG Yong-lin\*, DONG Jun,  
WANG Fei, TANG Zhen-hua, DU Yan-fen

(School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

\* Corresponding author, E-mail: 280468793@qq.com

**Abstract:** A method to design and prepare a Fresnel zone plate for all-optical type acceleration sensor was proposed, and the design principles and parameters of the Fresnel zone plate was introduced. The maximum and minimum theoretical radii of the wave band plate were  $494.19 \mu\text{m}$  and  $78.11 \mu\text{m}$  respectively with the size precision in micron level. The micro-nanofabrication process technology of the zone plate was developed. Then a high-quality zone plate was successfully fabricated. The boundary of the zone plate was smooth and complete, thus proving good focusing and imaging properties. Finally, an all-optical type acceleration sensor based on the zone plate diffractive properties was developed and tested. In terms of the output curves from the test, it shows that the output of the sensor proves a good linearity with the acceleration and the sensitivity is  $0.033 \text{ V/g}$ . The sensor guides light with optical fibers instead of electronic components, which provides good resistance to electromagnetic interference and promising applications in harsh environments.

**Key words:** diffractive optical element; zone plate; diffraction; microfabrication; acceleration sensor

收稿日期: 2016-05-28; 修订日期: 2016-06-12.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. U1510114, No. 51575437); 陕西省科技攻关计划资助项目(No. 2014K07-02)

## 1 引言

菲涅尔波带片是一种重要的光学元件,其工作原理是基于光的衍射。该元件是多焦点系统,除了主焦点外还有次焦点,具有同时生成多级像的功能。它还有实焦点和虚焦点,可以起到正透镜和负透镜的作用。相对于一般透镜而言,它有重量轻、可折叠、成本低等优点。近年来 Zhang S 等利用 3D 打印技术来制作菲涅尔波带片,可以为 8~12 GHz 以上频段提供 7.3~12.8 dB 的增益<sup>[1]</sup>。Mohammad J Moghimi 等在嵌入式 PDMS 基上实现了波带片阵列,它能够提高视图成像系统的视场<sup>[2]</sup>。G A Cirino 等采用低成本的自制无掩模光刻曝光系统来制造波带片阵列<sup>[3]</sup>。Kim Jun Ki 等通过飞秒激光加工和离子束光刻技术制作波带片,并对其加工好的透镜特性进行了研究<sup>[4-7]</sup>。Wang XF 等人使用菲涅尔波带片改善 x 射线的成像质量,实现了高分辨率下的大视场成像<sup>[8]</sup>。Jia Jia 等人将超高分辨率掩模板和波带片组合起来,在不增加制造难度的情况下实现了更小的聚焦斑点<sup>[9]</sup>。

本文设计加工了一种菲涅尔波带片,介绍了该菲涅尔波带片的设计原理和参数选择,开发了相应的微纳加工工艺流程,成功制备出了高质量的波带片。将该波带片应用于所研究的全光型加速度传感器中,获得了良好的传感特性。

## 2 波带片的设计

图 1 是菲涅尔波带片的结构示意图(含传感

器中的反光膜)。当点光源处于波带片的汇聚点时,经过波带片衍射之后,光线会在汇聚点聚焦,根据半波带理论,波带片各半波带的半径  $r_n$  为:

$$\begin{cases} s_1 + n_g s_2 - d_1 - n_g d_2 = n\lambda/4 \\ \frac{\sqrt{s_1^2 - d_1^2}}{s_1} = n_g \frac{\sqrt{s_2^2 - d_2^2}}{s_2} \\ r_n = \sqrt{s_1^2 - d_1^2} + \sqrt{s_2^2 - d_2^2} \end{cases}, \quad (1)$$

式中各参数的意义如图 1 所示,其中  $n_g$  为玻璃基片的折射率。

传感器系统的光路图表示在柱坐标系中(图 1),其中,  $P$  为汇聚点,  $r_n$  是第  $n$  个半波带的半径值,  $d_1, d_2$  分别表示汇聚点到玻璃基片的距离和玻璃基片的厚度。

波带片针对 He-Ne 激光器(光源为 632.8 nm)设计,焦距为 8 mm,玻璃基片折射率取 1.4,厚度为 2.3 mm,波带数为 40。所设计的波带片的各半径值如表 1 所示。最大理论半径为 494.19  $\mu\text{m}$ ,最小理论半径为 78.11  $\mu\text{m}$ 。从表 1 中可以看出所设计的半波带的尺寸精度在微米级,所以采用半导体的微细精密加工工艺进行制造。

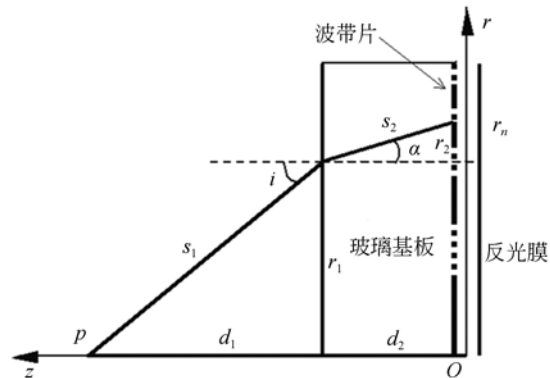


图 1 波带片结构示意图(含反光膜)

Fig. 1 Schematic diagram of Fresnel zone plate

表 1 菲涅尔波带片各波带半径值

Tab. 1 Wave band radii of Fresnel zone plate

( $\mu\text{m}$ )

$n$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$r_n$	78.11	110.47	135.30	156.23	174.68	191.35	206.68	220.95	234.36	247.04
$r_{10+n}$	259.10	270.62	281.67	292.31	302.57	312.50	322.12	331.46	34.54	349.39
$r_{20+n}$	358.02	366.45	374.69	382.75	390.65	398.39	405.98	413.43	420.75	427.95
$r_{30+n}$	435.03	441.99	448.85	455.60	462.26	468.82	475.29	481.67	487.97	494.19

## 3 波带片的加工流程

波带片的加工采用半导体精密微细加工工

艺,主要分为基片预处理、镀膜、匀胶、光刻和腐蚀等步骤,具体见图 2 所示。

### 3.1 基片预处理

该步骤主要进行基片的清洗,以保持基片的

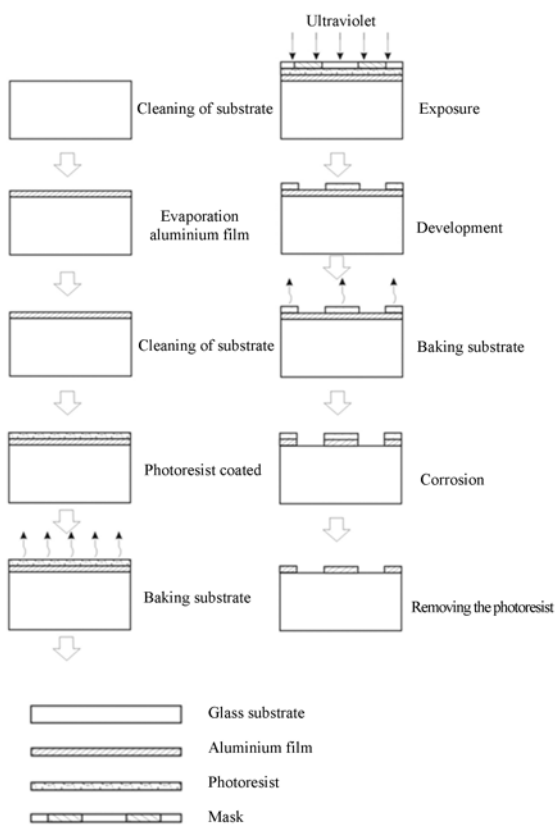


图 2 菲涅尔波带片加工步骤

Fig. 2 Processing steps of Fresnel micro lens

清洁,为下一步做准备。首先进行超纯水清洗,洗去污渍的同时保证不带有氯离子,对镀膜的影响降到最低。然后用丙酮超声去除附着在基片表面的胶状物。接下来采用乙醇超声去除油和污渍等。再将基片放入超纯水中进行超声处理,彻底清洁基片。最后对基片进行烘干,清除基片表面残留的水分。

值得注意的是,在制作菲涅尔波带片的时候,需要对基片清洗两次,清洗过程相同。第一次是在铝金属膜蒸镀前,第二次是在甩光刻胶前。当然,如果在铝金属膜蒸镀后直接甩光刻胶,则第二次清洗可以省略掉。

在进行上述清洗步骤之后,基片对镀膜的吸附能力将得到大大提高。

### 3.2 镀膜

目前,常用的镀膜方法有溅射法、化学镀、电镀、化学气相沉积和电子束蒸发等。本文加工波带片时采用电子束蒸发给基底材料镀上一层铝膜。具体做法是在真空环境下,电子束经 10~15 kV 电场加速,轰击熔融蒸发料,将铝加热使其气

化蒸发,蒸发后的原子将会在基底上形成薄膜。在蒸发的过程中,基底需要不停地旋转,以便保证薄膜的均匀性。这种方式制造的铝薄膜质量好,沉积的速度较快。薄膜厚度控制在 200~300 nm。

### 3.3 匀胶

基片表面需要涂覆一层光刻胶,以用作图形模版并在刻蚀的时候保护基底材料。

### 3.4 光刻

光刻的步骤有前烘、曝光、显影和坚膜。

前烘:曝光前基片需要放入烘箱先烘 30 min 左右,温度为 80 °C 左右。前烘可以去除光刻胶的溶剂,增加胶膜的抗腐蚀性以及增大基片上的铝膜与光刻胶之间的附着力,确保光刻模版不会在接触式曝光时被污染或损伤。

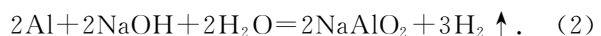
曝光:曝光的目的是在光刻胶层形成所需图形潜影。本文采用接触式曝光法。接触式曝光要求光刻胶与模板紧密接触,可以防止映射造成的分辨率下降,图像模糊等缺陷。

显影:本文的波带片在制作时采用正性光刻胶,光刻胶和显影液在曝光后发生作用,溶解掉感光过的部分,使其脱离基片表面。

坚膜(后烘):后烘的目的是使胶膜坚固,增强其抗腐蚀性,消除显影时胶膜在显影液中产生的溶胀和软化现象。时间在 40 min 左右,温度为 140 °C。

### 3.5 腐蚀

本文采用氢氧化钠溶液作为显影液,其配比为氢氧化钠:水=2.5 克:500 毫升。氢氧化钠溶液用来腐蚀铝膜,其化学反应方程式如下:



氢氧化钠腐蚀法可以在室温条件下进行,具有操作简单、成本低、无毒害和时间短的特点。此外,由于溶液浓度不高,从而腐蚀铝膜的速度较慢,腐蚀过程相对比较容易控制,侧向腐蚀的影响也比较小。

### 3.6 去胶

丙酮溶液用来溶解光刻胶,去胶过程分三步:首先是丙酮浸泡,然后乙醇浸泡,最后用超纯水进行清洗。

图 3 是用上述工艺加工好的菲涅尔波带片,可以看出,波带片的各个半波带具有光滑的边界和较好的质量。经过聚焦实验验证,该波带片具有良好的聚焦效应。

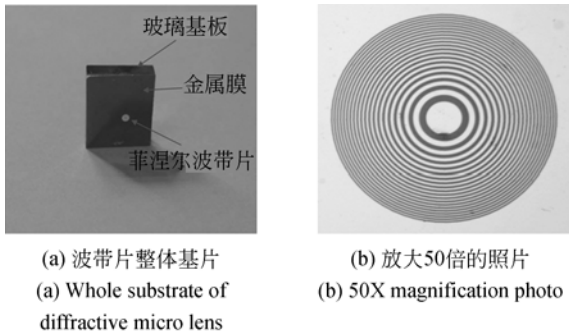


图 3 加工好的菲涅尔波带片  
Fig. 3 Photos of Fresnel micro lens

### 4 波带片在加速度传感器中的应用

图 4 是全光加速度传感器的结构示意图,菲涅尔波带片是其中的核心部件。激光器发出的单色光经过入射光纤进入传感器头,经过波带片和反光膜之后,透过波带片的一部分光被反光膜反射回来,另一部分则被波带片的反光带反射回来。两部分光在波带片前方焦点处会聚并发生干涉,接收光纤负责接收干涉光。微反光膜上加工有一个质量块,可以敏感加速度。在加速度的作用下,微反光膜和菲涅尔波带片之间会发生改变,从而调制进入接收光纤中的光强,实现加速度的光探测。

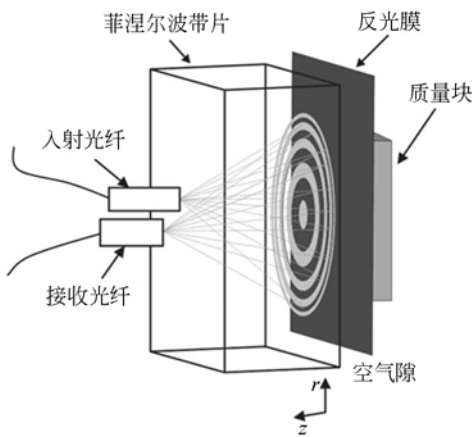


图 4 全光加速度传感器的结构示意图  
Fig. 4 Structural diagram of all-optical accelerometer

根据菲涅尔波带片的工作原理,当波带片与反光膜之间的距离为  $N(\lambda/2)$  时,两部分光干涉相消,汇聚点的光强最小;当波带片与反光膜之间的距离为  $N(\lambda/2) + \lambda/4$  时,两部分光干涉相长,

汇聚点的光强最大。所以反光膜的位置每改变  $\lambda/4$ ,光强就会产生极大与极小值,因此传感器对反光膜的位置十分敏感。当波带片与反光膜的距离变化  $\lambda/2$  时,探测器上的光强会产生周期性的变化。光纤所能接收到的光源强度满足<sup>[10]</sup>:

$$M = \frac{I}{I_{MAX}} = 1/2 \frac{(1 + \rho)^2 (1 - \cos(2\beta))}{\rho^2 + 1 - 2\rho\cos(2\beta)}, \tag{3}$$

式中:  $I_{MAX}$  是对应于  $\beta = \pi/2$  的最大光强度;  $\beta = (2\pi/\lambda)d$ ,  $d$  是菲涅尔衍射透镜和反射膜之间的距离;  $\rho$  是玻璃-空气界面的反射系数。图 5 是  $\rho=0.2$  时的理论模拟曲线。

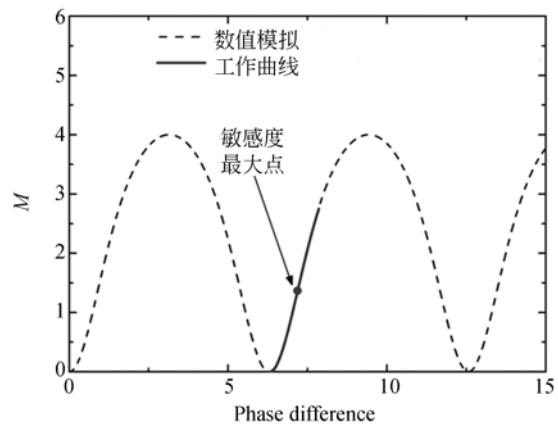


图 5 M 的理论模拟曲线  
Fig. 5 Theoretical simulation curve of M

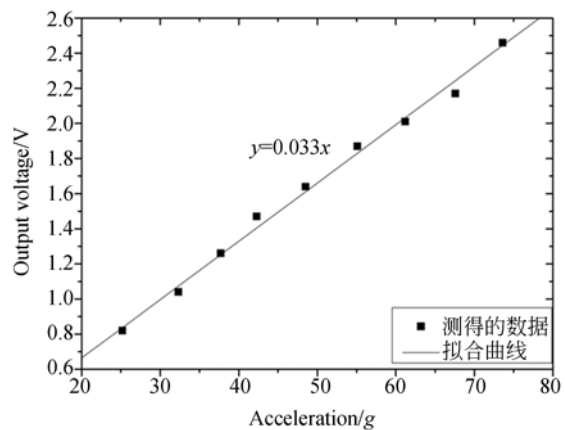


图 6 实测的传感器输出曲线  
Fig. 6 Measured sensor output curve

从图 5 中可以看出  $M$  随着空气隙的厚度  $d$  呈周期性变化,因此干涉光强的变化由反光膜的位置变化决定。在图 5 中取比值  $M$  与空气隙厚度  $d$  之间线性度比较好的线段,这样就可以保

证空气隙厚度  $d$  与探测器测得的光强  $I$  成近似线性的关系,其灵敏度为  $0.033 \text{ V/g}$ 。除此之外,从图中可以看出线性度较好的曲线中部正是最高灵敏度点的位置,这更加确保了空气隙与光强的线性关系及灵敏度。图 6 是实测的传感器输出和加速度的关系曲线,可见两者具有较好的线性度。

#### 参考文献:

- [1] ZHANG S. Design and fabrication of 3D-printed planar Fresnel zone plate lens[J]. *Electronics Letters*, 2016,52(10): 833-835.
- [2] MOGHIMI M J, FERNANDES J, KANHERE A, *et al.*. Microscale Fresnel zone plate array on flexible substrate [C]. *2015 18th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems. Anchorage Alaska: Transducers*, 2015:395-398.
- [3] CIRINO G A, LOPERA S A, MONTAGNOLI A N, *et al.*. Low-cost Fresnel microlens array fabricated by a home-built maskless lithography system [J]. *SPIE*, 2012,8489(848908):1-7.
- [4] KIM J K, KIM J, OH K, *et al.*. Fabrication of micro Fresnel zone plate lens on a mode-expanded hybrid optical fiber using a femtosecond laser ablation system [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2009,21(1):21-23.
- [5] LI Q K, YU Y H, WANG L, *et al.*. Sapphire-based fresnel zone plate fabricated by femtosecond

## 5 结 论

本文采用微细加工的工艺制作菲涅尔衍射波带片,该波带片具有良好的聚焦性能。基于该波带片研制了一种全光型加速度传感器,该传感器利用光纤来导光,传感器头内没有电子元件,具有良好的抗电磁干扰能力,可以应用于恶劣环境中。

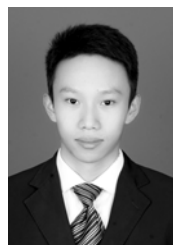
- laser direct writing and wet etching [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2016, 128 (12): 1290-1293.
- [6] KESKINBORA K, GREVENT C, BECHTEL M, *et al.*. Ion beam lithography for Fresnel zone plates in X-ray microscopy [J]. *Optics Express*, 2013, 21 (10):11747-11756.
- [7] KIM J, HA W, PARK J, *et al.*. Micro Fresnel zone plate lens inscribed on a hard polymer clad fiber using femtosecond pulsed laser [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2013, 25(8):761-763.
- [8] WANG X F, WANG J Y, CHEN X H, *et al.*. Large field-of-view X-ray imaging by using a Fresnel zone plate [J]. *Laser and Particle Beams*, 2012, 30(1):87-93.
- [9] JIA J, XIE CH Q, LIU M, *et al.*. A super-resolution Fresnel zone plate and photon sieve [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2010, 48(7):760-765.
- [10] KONG W J, JIA SH H, YANG J. Computer simulation for the principle of a new optical acceleration sensor [J]. *SPIE*, 2006, 6149(614924):1-5.

#### 导师简介:



贾书海(1969—),男,陕西咸阳人,博士,教授,博士生导师,2000年于西安交通大学获得博士学位,主要从事智能光电传感技术、智能光机电一体化技术等方面的研究。E-mail: shjia@mail.xjtu.edu.cn

#### 通讯作者:



汪永林(1992—),男,四川邛崃人,硕士研究生,2011年于成都电子科技大学获得学士学位,主要从事光电检测的研究。E-mail:280468793@qq.com