

自支撑二值化 Beynon-Gabor 波带片的制备及其单级聚焦特性

李兆国 孟令彪 周民杰 刁凯迪 易勇 朱效立 吴卫东 张继成

Fabrication of self-standing binary Gabor zone plate and its single order diffraction

Li Zhao-Guo Meng Ling-Biao Zhou Min-Jie Diao Kai-Di Yi Yong Zhu Xiao-Li Wu Wei-Dong
Zhang Ji-Cheng

引用信息 Citation: [Acta Physica Sinica](#), 65, 124207 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.124207

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.124207>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I12>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

非相干照明条件下的 ptychographic iterative engine 成像技术

Ptychographic iterative engine with the incoherent illumination

物理学报.2015, 64(24): 244201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.244201>

可调谐型金属线栅偏振器的特性研究

Research on the characteristics of tunable structure nanowire-grid polarizer

物理学报.2013, 62(14): 144214 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.144214>

全光纤量子通信系统中的高速偏振控制方案

High-speed polarization controller for all-fiber quantum communication systems

物理学报.2013, 62(8): 084214 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.084214>

带虚设层的抗反射结构导模共振滤波器设计与分析

Design and analysis of guided-mode resonance filter containing an absentee layer with an antireflective surface

物理学报.2013, 62(2): 024215 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.024215>

提升啁啾脉冲激光信噪比的扫描滤波方法

A scanning filtering method for enhancing the signal-to-noise ratio of chirped laser pulse

物理学报.2012, 61(15): 154209 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.154209>

自支撑二值化Beynon-Gabor波带片的制备 及其单级聚焦特性*

李兆国¹⁾ 孟令彪¹⁾ 周民杰¹⁾ 刁凯迪¹⁾ 易勇²⁾ 朱效立³⁾
吴卫东¹⁾ 张继成^{1)†}

1) (中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 绵阳 621900)

2) (西南科技大学材料科学与工程学院, 绵阳 621010)

3) (中国科学院微电子研究所, 微电子器件与集成技术重点实验室, 北京 100029)

(2015年9月29日收到; 2016年2月25日收到修改稿)

Gabor波带片是一种理想的单级聚焦光学元件, 但制备困难. 本文采用聚焦离子束直写技术成功制备出30环、20扇区的二值化Beynon-Gabor波带片, 其有效面积半径为700 μm , 第一环半径90 μm . 利用各向异性腐蚀液对硅基底进行开孔, 实现了Beynon-Gabor波带片二值化、自支撑、镂空的结构特征. 在波长为355 nm的激光下测试其光学性能, 结果表明所制备的Beynon-Gabor波带片主光轴上只存在1级衍射叠加后的焦点, 不存在高级衍射焦点, 具有优异的单级聚焦性能.

关键词: 二值化Beynon-Gabor波带片, 自支撑, 衍射性能, 聚焦离子束直写技术

PACS: 42.79.Ci, 42.25.Fx, 81.16.Rf

DOI: 10.7498/aps.65.124207

1 引言

波带片是一种受衍射光栅调制的聚焦元件, 由线密度沿径向增加且明暗相间的同心圆环带组成^[1,2]. 传统的Fresnel波带片^[3]得到了长足的发展, 其最外环尺寸可达15 nm, 在红外、紫外以及X射线波段得到了广泛应用, 为天文学、光谱分析、X射线成像和聚焦等诸多领域提供了重要的物理实验信息^[4,5]. 然而, Fresnel波带片因存在多级衍射而具有多个焦点, 这给光谱分析和成像处理带来很大影响, 使其应用受到限制^[6-10]. 与Fresnel波带片不同, Gabor波带片由正弦形光孔组成, 其透过率沿径向满足余弦变化, 具有单级衍射特性. 因此, 利用Gabor波带片作为聚焦元件时, 只存在一个焦点, 这为物理诊断实验带来了极大的方便, 具有潜在的应用价值. 此外, 最近发展的量子点阵光

栅^[11,12]同样具有单级衍射的特性, 为微纳光学的应用领域又增加了一个可供选择的单级聚焦元件. 而本文将主要讨论自支撑二值化Beynon-Gabor波带片的单级聚焦特性.

虽然Gabor波带片聚焦性能优越, 但其制作工艺困难复杂, 很难满足理想的正弦透射条件^[13-15]. 因此, 长期以来Gabor波带片没有得到广泛的关注, 其研制方面也没有较大的进步和提高. 1992年, Beynon^[16]提出了二值化Gabor波带片的概念, 并采用紫外光刻法在玻璃基底上成功制备出该元件, 在波长为633 nm的He-Ne激光下测试了其光学性能. 这一结果为Gabor波带片在软X射线波段的应用提供了契机, 具有划时代的意义. 此后, Choy和Cheng^[17]又设计、制备了近似余弦结构的二值化Gabor波带片, 聚焦效率在Beynon的基础上提高了23%. Wei等^[18]和Fan等^[19]设计了环面状和六边形的二值化Gabor波带片, 解决了传统观念二

* 国家自然科学基金(批准号: 11404304, 60908023)和国家重大科学仪器设备开发专项(批准号: 2014YQ090709)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: zhangjccaep@126.com

值化波带片设计中存在大量尖角而在加工中难以实现的问题. 尽管如此, 目前二值化 Gabor 波带片大多采用紫外光刻 (ultraviolet lithography, UVL)、电子束光刻 (electron beam lithography, EBL) 技术制备, 一方面是工艺较为繁琐^[20], 使得对二值化 Gabor 波带片的实验研究鲜有报道. 另一方面则是制备的波带片以二氧化硅或者聚酰亚胺薄膜作为支撑结构, 这些衬底在极紫外和 X 射线波段对光有极强的吸收、散射作用, 透过率极低, 限制了二值化 Gabor 波带片在极紫外和软 X 射线波段的应用. 因此, 发展更为简便的二值化 Gabor 波带片制备方法和制备自支撑的二值化 Gabor 波带片具有非常重要的意义. 本文发展的聚焦离子束 (focused ion beam, FIB) 直写技术尝试在自支撑二值化 Gabor 波带片的制备技术方面展开初步研究.

本文研究了 Beynon-Gabor 波带片光学衍射旁瓣的聚焦特性, 并在紫外波段进行了原理验证. 我们制备了一种新型二值化 Gabor 波带片结构: 透射式自支撑二值化 Beynon-Gabor 波带片. 这种二值化 Beynon-Gabor 波带片由准正弦状的通光结构组成, 保证其透过率沿径向满足准余弦分布. 采用聚焦离子束直写技术在金吸收体上制备出的二值化 Beynon-Gabor 波带片, 无需支撑衬底, 通光部分透过率为 1, 金吸收体部分透过率为 0, 真正实现了 Beynon-Gabor 波带片自支撑、二值化的特征. 以波长 355 nm 激光为光源, 对所制备的二值化 Beynon-Gabor 波带片的聚焦性能进行了测试, 结果表明其具有良好的单级聚焦性能. 尽管 FIB 直写技术在波带片制备工艺方面并不比先前报道的 UVL 和 EBL 等技术更为方便, 然而, 基于本文介绍的方法所制备的自支撑波带片却规避了衬底 (如二氧化硅、聚酰亚胺) 对波带片衍射性能的负面影响, 从而使得所制备的二值化 Beynon-Gabor 波带片有望应用于极紫外和软 X 射线波段.

2 波带片设计

以负 Gabor 波带片为例. 负 Gabor 波带片的透过率沿径向满足以下关系:

$$t(r) = \frac{1}{2} \left[1 - \cos \left(\frac{\pi r^2}{r_1^2} \right) \right], \quad (1)$$

其中 r_1 是 Gabor 波带片第 1 环的半径. 根据上述关系式, 当透过率 $t(r)$ 取最大值与最小值时, 可以得

出外环半径与第 1 环半径的关系, 即 $r_n = r_1 \sqrt{n}$, 其中 r_n 是第 n 环的半径. 从 (1) 式还可以看出, 在奇数环处 ($n = 1, 3, 5, 7, 9, \dots$), 透过率最大; 在偶数环处 ($n = 2, 4, 6, 8, \dots$), 透过率最小. 如果在相邻两偶数环之间, 加工成余弦波包络状透光结构且在奇数环处达到最大值, 使包络之内透过率为 1, 包络之外透过率为 0, 则可满足 Gabor 波带片径向透过率分布函数沿径向呈余弦分布的要求. 根据上述分析, 可以设计如图 1 所示的二值化 Gabor 波带片. 由于本文设计的波带片将应用于极紫外波段, 根据波带片焦距 f 与入射光波长 λ 的关系 $f = r_1^2/\lambda$ 可知, 为保证焦距 f 在实验可操作的范围内 (厘米量级), 从而对波带片第一环半径 r_1 的大小提出了要求. 在本文中, 我们设计 $r_1 = 90 \mu\text{m}$. 从图 1 中可以看到, 我们将 Beynon-Gabor 波带片分成了 20 个扇形区域, 每个区域有 30 个透光结构, 则等效环数为 $n = 60$, 其中黑色为不透光部分, 透过率为 0, 白色部分为透光部分, 透过率为 1. 这里对等效环数的设计是综合考虑波带片衍射特性与微加工实验能力的结果, 等效环数越多, 则波带片的衍射能力越接近理想情形, 然而实验加工也越发困难, 我们最终确定 $n = 60$.

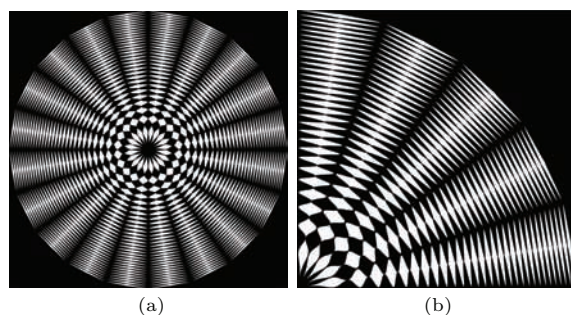


图 1 二值化 Beynon-Gabor 波带片设计图 20 个区域, 60 环, 第一环半径 $r_1 = 90 \mu\text{m}$

Fig. 1. The schematic diagram of the binary Beynon-Gabor zone plate.

3 波带片衍射性能的计算结果

Beynon-Gabor 波带片的聚焦特性可以利用瑞利-索莫菲相关性来解释. 当一束振幅为 1、波长为 λ 的平面波入射到 Beynon-Gabor 波带片时, 在垂直于其主光轴 (z 轴) 的平面上的光强分布可表示为

$$U(x, y, z) = \frac{z}{i\lambda} \iint_{\Sigma} t(\xi, \eta)$$

$$\frac{\exp \left[ik \sqrt{(\xi - x)^2 + (\eta - y)^2 + z^2} \right]}{(\xi - x)^2 + (\eta - y)^2 + z^2} d\xi d\eta. \quad (2)$$

从上式可以看出, 当 $z = r_1^2/\lambda$ 时, 振幅取得最大值, 即 z 轴上的这点是 Beynon-Gabor 波带片的焦点。

根据上述理论, 利用 Matlab 软件对 Beynon-Gabor 波带片的聚焦特性进行了数值模拟. 图 2 是根据图 1 所设计的 Beynon-Gabor 波带片结构及参数建立的数学模型, 入射波长为 355 nm, 主光轴上的计算范围为 ± 3.0 cm, 衍射光强沿主光轴分布的计算结果显示在图 3 中. 从图 3 可以看出, Beynon-Gabor 波带片的光场分布没有受到高级衍射的干扰, 其能量在 $z = 2.28$ cm 处获得最大值, 这一结果符合解析理论计算值 2.28 cm ($z = r_1^2/\lambda$).

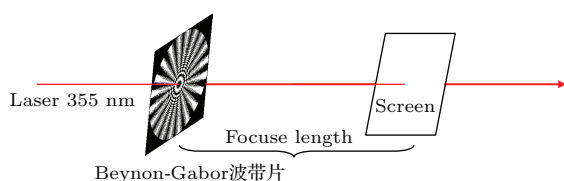


图2 二值化 Beynon-Gabor 波带片模拟的数学模型
Fig. 2. The computational model of binary Beynon-Gabor zone plate.

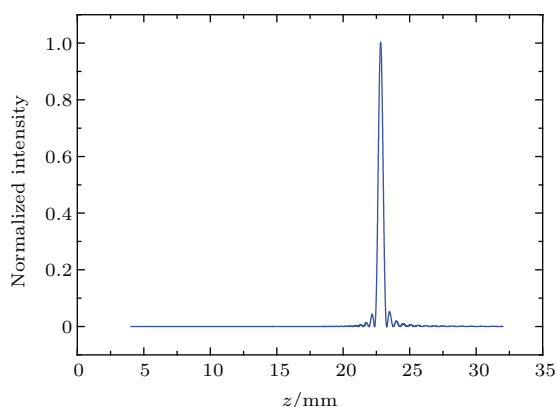


图3 二值化 Beynon-Gabor 波带片光强沿轴向分布的数值模拟结果
Fig. 3. The numerical intensity as a function of axial distance (z) of the binary Beynon-Gabor zone plate.

4 波带片制备

由前面所述的理论分析和设计可以看出, 准正弦二值化 Beynon-Gabor 波带片只存在一对共轭焦点, 可以消除 Fresnel 波带片存在多个焦点所带来的不利影响. 但是, 迄今为止尚未制备出自支撑准正弦二值化金属基材料的 Gabor 波带片. 以前所制备的二值化 Gabor 波带片大多采用光刻技术制备, 如 UVL 和 EBL 光刻技术, 尚未做到“自支撑”

和“镂空”的金属结构, 在透光部分还有一层支撑薄膜 (聚酰亚胺, 氮化硅) 存在, 不但影响光的透过率, 还会引起相位差.

本次实验所用的自支撑、透射式、金吸收体准正弦二值化 Beynon-Gabor 波带片是采用 FIB 直写法制备的. 采用 FIB 直写技术加工准正弦二值化 Gabor 波带片的工艺流程如图 4 所示: 1) 采用标准的 RCA-1 清洗工艺对单晶硅片 (晶向为 $\langle 100 \rangle$, 厚度为 $300 \mu\text{m}$) 进行清洗, 以去除硅片表面的颗粒物质和金属离子; 2) 将清洗后的硅片放置于热氧化炉中, 在硅片的两个表面上氧化生长一层 300 nm 厚的 SiO_2 层, 用作后续湿法腐蚀的阻挡层; 3) 利用磁控溅射薄膜沉积技术在双面氧化的硅片的一面上沉积 Cr/Au 薄膜, 作为光栅的吸收体, 其中 Cr 层厚度为 30 nm , Au 层厚度为 500 nm , Cr 层作为过渡层的作用是使 Au 层能较好地附着在基底上; 4) 在未沉积 Cr/Au 薄膜的一面上采用紫外光刻 (光刻机型号为 SUSS MA6/BA6) 技术制备出一个 $2 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ 的腐蚀窗口; 5) 将上述硅片先浸泡在 HF 中将表面的 SiO_2 腐蚀掉, 再浸泡在 KOH 溶液 (40% , 60°C) 中进行湿法化学腐蚀, 将曝光部分

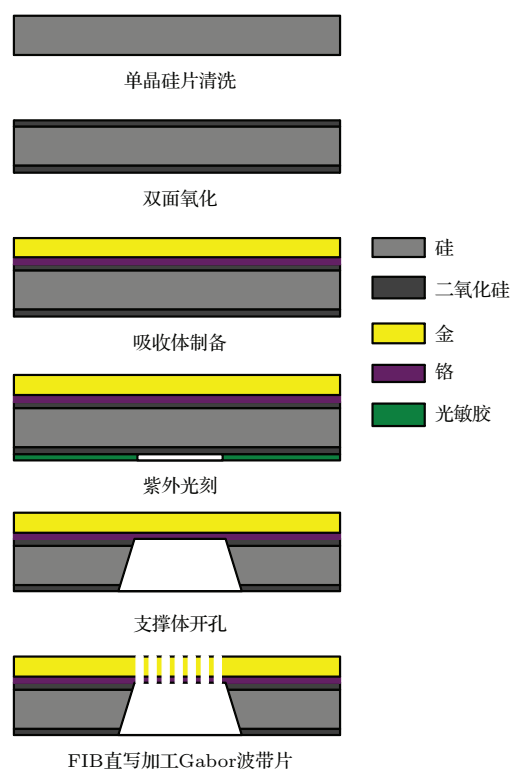


图4 (网刊彩色) FIB 直写技术加工准正弦二值化 Beynon-Gabor 波带片的工艺流程图
Fig. 4. (color online) The schematic diagram of the sample preparation process.

的硅基体完全腐蚀(用时约3 h), 最后再用HF将另一面的 SiO_2 去除, 从而形成一个 $2\text{ mm} \times 2\text{ mm}$ 的自支撑Au薄膜窗口; 6) 用丙酮去除硅基底上的残余光刻胶, 并用去离子水清洗, 从而获得硅基底上自支撑的Au薄膜, 如图5所示, 其中图5(a)显示的是湿法腐蚀之前的Au薄膜的SEM图像, 当硅基体被腐蚀掉后, 可以从图5(b)中看到硅基体开孔中的自支撑的Au薄膜; 7) 根据第2节中准正弦二值化Beynon-Gabor波带片的设计结果, 我们将图1(a)所示的图形划分为 6000×6000 的网格(即图形制作分辨率为 $0.23\text{ }\mu\text{m}$), 并将其制作成BMP位图格式文件输入FEI Helios NanoLab 600i双束显微系统的控制计算机中, 以驱动高能聚焦 Ga^+ 束(30 keV)按图形设计路径轰击Au膜, 实现准正弦二

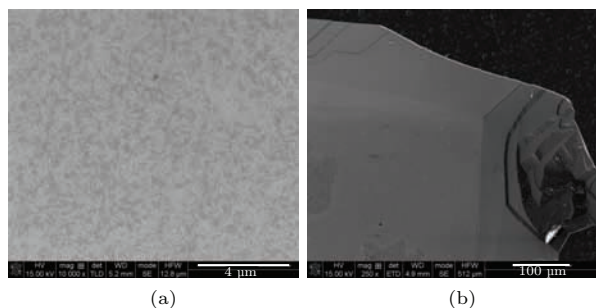


图5 (a) Au薄膜的SEM图像; (b) 湿法腐蚀硅基体后形成的自支撑Au薄膜

Fig. 5. (a) The SEM image of Au film; (b) the SEM image of self-standing Au film.

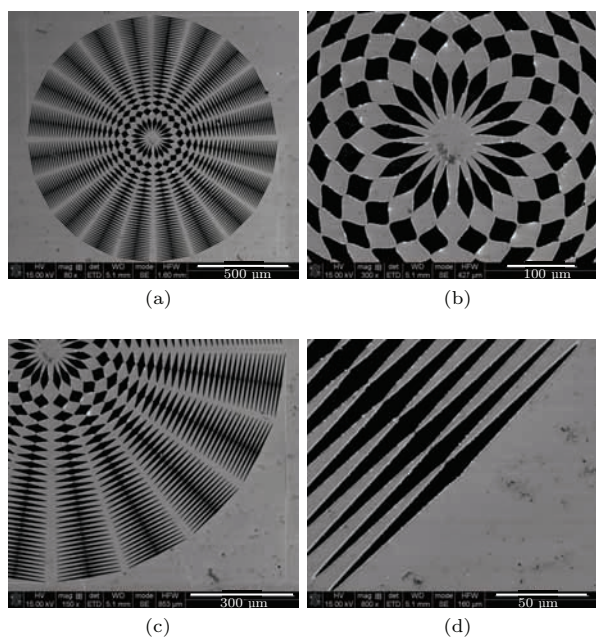


图6 准正弦二值化Beynon-Gabor波带片的SEM图
Fig. 6. The SEM images of quasi-sinusoidal binary Beynon-Gabor zone plate.

值化Beynon-Gabor波带片图形的转移和加工. FIB直写制作一片直径为 1.4 mm 的Beynon-Gabor波带片(图6)需用时约7 h (离子束电流为 48 pA).

图6所示为制备成功的一个典型的准正弦二值化Beynon-Gabor波带片, 该准正弦二值化Beynon-Gabor波带片为镂空结构(整个圆形镂空结构区域的直径约为 1.4 mm), 其中透光部分透过率为1, 非透光部分(基底)透过率为0, 透过率沿径向满足余弦分布. Au吸收体厚度 500 nm , 第一环等效半径 $90\text{ }\mu\text{m}$, 共有30个周期(等效环数 $n = 60$), 分为20个扇区, 扇区之间的吸收体使各个扇区连接在一起, 无需加强筋就可实现自支撑, 从而可以消除支撑薄膜对探测光的影响.

5 波带片衍射性能的实验结果

图7所示为Beynon-Gabor波带片的衍射实验布局图. 实验以单色激光器(型号: DC50 H-355)作为入射光光源, 波长为 355 nm , 激光功率为 0.5 W ; 经过扩束镜和滤波器转换成平行光, 再经适当衰减后(以保护CCD探测器), 照射在波带片上. 调整波带片位置, 使得光斑垂直入射到波带片有效区域中. 衍射图形用CCD探测器直接进行记录, 沿光轴移动CCD探测器, 得到光轴上衍射强度的分布图. CCD探测器的灵敏面面积为 $7.1\text{ mm} \times 5.4\text{ mm}$, 像素点阵为 1616×1216 , 从而每个像素点大小为 $4.4\text{ }\mu\text{m} \times 4.4\text{ }\mu\text{m}$. 使用激光光斑品质分析软件LBA-USB以及Matlab图像处理软件对CCD所记录的光强分布图进行处理, 可以得到Beynon-Gabor波带片焦点的位置、焦点处光强以及焦斑大小等信息.

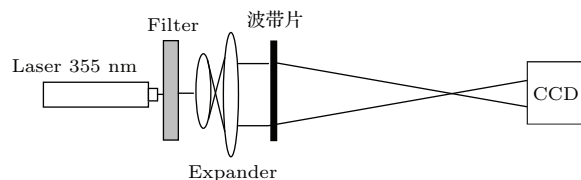


图7 Beynon-Gabor波带片实验测量布局图

Fig. 7. The schematic diagram of optical measurement configuration.

Beynon-Gabor波带片的聚焦原理是吸收体上分布的每一扇区都作为一个正弦光栅, 当一束平面光入射时, 其在径向上会形成 ± 1 级与0级衍射

点. 当一个圆周之内所有扇区都发生衍射, 则 -1 级衍射点会在主光轴的某一点上进行叠加形成焦点, 而 $+1$ 级与 0 级衍射则向外围发散开. 图 8 所示为主光轴上光强的峰值归一化分布图, 从图中可以看出, Beynon-Gabor 波带片在主光轴上的光强分布除了存在 1 级焦点外, 高级衍射被有效抑制, 正如数值计算结果展示的那样. 在定量上, 我们可以从图 8(c) 和图 8(d) 中得到焦点距波带片所在平面的距离为 22.8 mm, 它与理论预期值 22.82 mm ($f = r_1^2/\lambda = (90\mu\text{m})^2/355\text{ nm} = 22.82\text{ mm}$) 完全一致.

图 9 所示为波带片的焦平面上(通过焦点, 垂直于光轴)光强分布的峰值归一化图, 可以看出, 光强被有效聚焦于中心斑点处, 光斑直径约 $18\mu\text{m}$, 半高宽约 $9\mu\text{m}$, 展示了波带片优良的单级聚焦性能. 此外, 从图 9(a) 中还可以看到, 除了一个尖锐

的中心焦斑外, 几乎看不到其他衍射斑点存在. 而在 Greve 等^[20]报道的实验结果中, 在焦平面上除了中心焦斑外, 在其周围还分布着若干高阶焦点, 而作者将这些高阶焦点的出现归因于图形制备的不完美. 由此可见, 本文发展的 FIB 直写技术制备准正弦二值化 Beynon-Gabor 波带片具有优良的图形转移和加工能力, 从而实现了严格的单级聚焦特性.

本文制备的 Beynon-Gabor 波带片的另一个特色是其自支撑特性. 之前的研究均在玻璃或聚酰亚胺衬底上制备光栅微结构^[16,17,19,20], 衬底对极紫外和 X 射线波段电磁波的强烈吸收或散射作用而限制了 Beynon-Gabor 波带片在该波段的应用. 而本文制备的自支撑 Beynon-Gabor 波带片则完全规避了衬底对电磁波的影响, 从而将 Beynon-Gabor 波带片的应用领域拓展至极紫外和 X 射线波段.

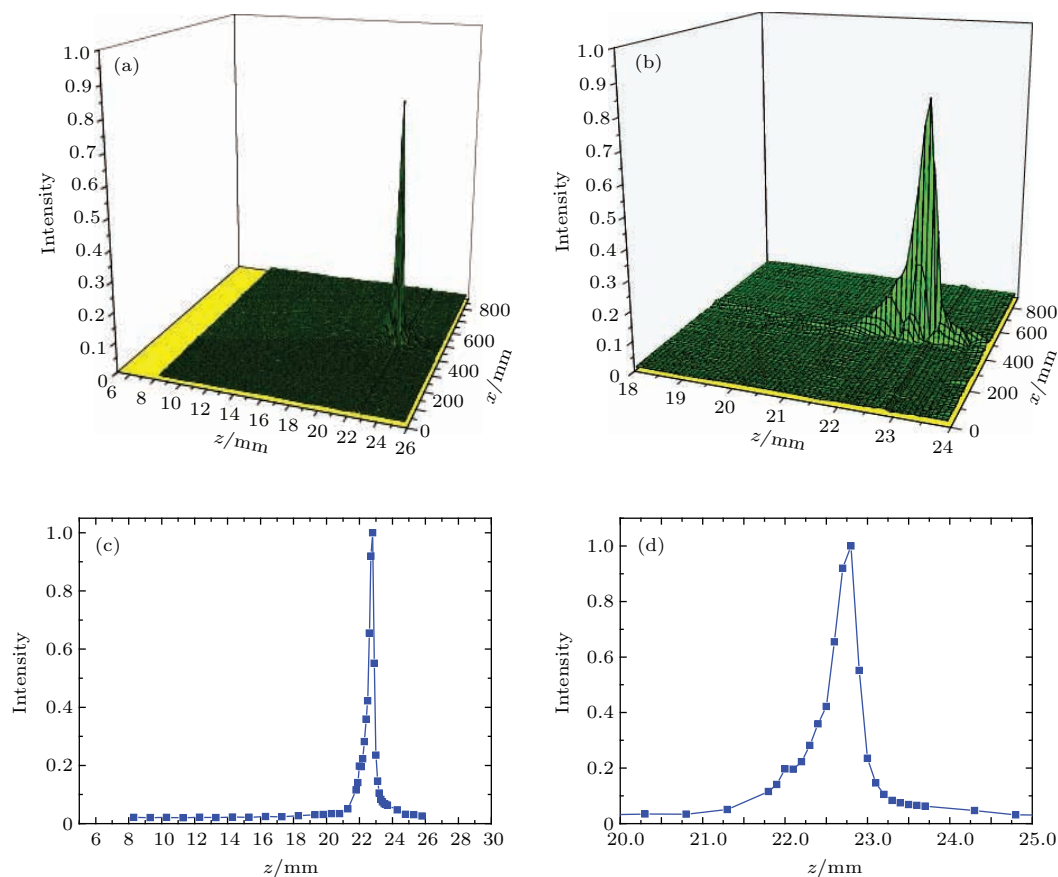


图 8 (网刊彩色) Beynon-Gabor 波带片衍射场沿光轴方向的强度分布 (a) 垂直于光轴衍射光强的纵向分布; (b) 图 (a) 的放大图; (c) 衍射光强沿光轴方向的分布; (d) 图 (c) 的放大图

Fig. 8. (color online) The measured diffraction intensity of the binary Beynon-Gabor zone plate: (a) The three-dimensional diagram of diffraction intensity against the axial distance (z) and the lateral distance (x); (b) the zoom-in view of the focus in (a); (c) the line-cut plot of the intensity vs. the axial distance (z) at the focus as shown in (a); (d) the zoom-in view of (c).

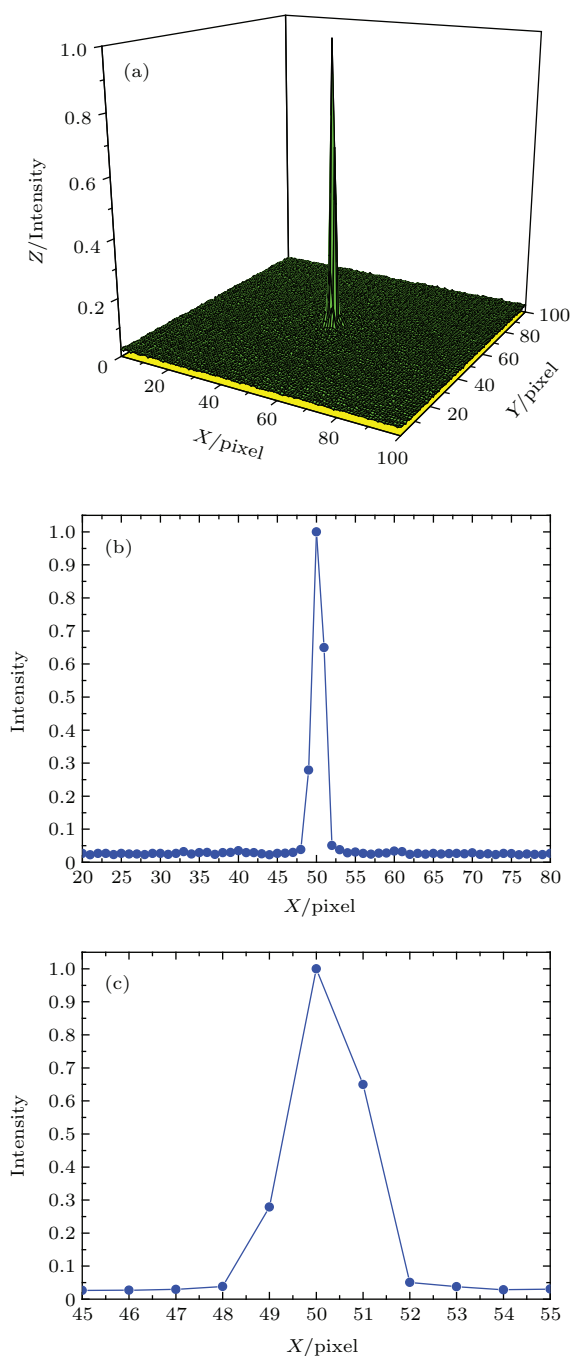


图9 (网刊彩色) Beynon-Gabor波带片衍射实验结果 (a) 焦点处光斑光强的平面分布; (b) 焦平面上光强的分布; (c) 图(b)的放大

Fig. 9. (color online) The experimental results of the binary Beynon-Gabor zone plate: (a) The measurement three-dimensional diagram of the optical diffraction intensity at the focus; (b) the line-cut plot at the focus as shown in (a); (c) the zoom-in view of focus in (b).

6 结 论

基于聚焦离子束直写技术, 自支撑准正弦二值化Beynon-Gabor波带片得以成功制作. 其加工尺寸和结构分布符合理论设计的要求. 相比传统的光

刻工艺, 本工作所获得的Beynon-Gabor波带片是一种自支撑、镂空结构, 摒除了传统波带片的支撑结构(聚酰亚胺、氮化硅薄膜)对其光学性能产生的影响. 理论模拟与实验结果都表明, Beynon-Gabor波带片具有优异的光学单级聚焦性能, 高级焦点被有效抑制, 实验测量的一级主焦点的位置符合理论公式的预期. 相关研究为二值化Beynon-Gabor波带片应用于极紫外波段、软X射线波段提供了重要的契机.

参考文献

- [1] Vila-Comamala J, Borrisé X, Pérez-Murano F, Campos J, Ferrer S 2006 *Microelectron. Eng.* **83** 1355
- [2] Wang Y, Yun W, Jacobsen C 2003 *Nature* **424** 50
- [3] Tao S H, Yuan X C, Lin J, Burge R E 2006 *Appl. Phys. Lett.* **89** 031105
- [4] Shu J H, Chen Z Y, Pu J X, Liu Y X 2011 *Chin. Phys. B* **20** 114202
- [5] Giménez F, Monsoriu J A, Furlan W D, Pons A 2006 *Opt. Express* **14** 11958
- [6] Fabrizio E D, Romanato F, Gentili M, Cabrini S, Kaulich B, Susini J, Barrett R 1999 *Nature* **401** 895
- [7] Srisungsitthisunti P, Ersoy O K, Xu X 2009 *J. Opt. Soc. Am. A* **26** 2114
- [8] Chu Y S, Yi J M, de Carlo F, Shen Q, Lee W K, Wu H J, Wang C L, Wang J Y, Liu C L, Wang C H, Wu S R, Chien C C, Hwu Y, Tkachuk A, Yun W, Feser M, Liang K S, Yang C S, Je J H, Margaritondo G 2008 *Appl. Phys. Lett.* **92** 103119
- [9] Gorelick S, Vila-Comamala J, Guzenko V A, Barrett R, Salomé M, David C 2011 *J. Synchrotron Radiat.* **18** 442
- [10] Zhang Y, Qi H J, Yi K, Wang Y Z, Sui Z, Shao J D 2015 *Chin. Phys. B* **24** 054212
- [11] Huang C L, Zhang J C, Diao K D, Zeng Y, Yi Y, Cao L F, Wang H B 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 018101 (in Chinese) [黄成龙, 张继成, 刁凯迪, 曾勇, 易勇, 曹磊峰, 王红斌 2014 物理学报 **63** 018101]
- [12] Zhang J C, Liu Y W, Huang C L, Zhang Q Q, Yi Y, Zeng Y, Zhu X L, Fan Q P, Qian F, Wei L, Wang H B, Wu W D, Cao L F 2014 *Chin. Phys. Lett.* **31** 124204
- [13] Cao L F, Förster E, Fuhrmann A, Wang C K, Kuang L Y, Liu S Y, Ding Y K 2007 *Appl. Phys. Lett.* **90** 053501
- [14] Wang C K, Kuang L Y, Wang Z B, Liu S Y, Ding Y K, Cao L F, Foerster E, Wang D Q, Xie C Q, Ye T C 2007 *Rev. Sci. Instrum.* **78** 053503
- [15] Wang C K, Kuang L Y, Wang Z B, Cao L F, Liu S Y, Ding Y K, Wang D Q, Xie C Q, Ye T C, Hu G Y 2008 *Rev. Sci. Instrum.* **79** 123502
- [16] Beynon T D, Kirk I, Mathews T R 1992 *Opt. Lett.* **17** 544
- [17] Choy C M, Cheng L M 1994 *Appl. Opt.* **33** 794
- [18] Wei L, Kuang L Y, Fan W, Zang H P, Cao L F, Gu Y Q, Wang X F 2011 *Opt. Express* **19** 21419

[19] Fan W, Wei L, Zang H P, Cao L F, Zhu B, Zhu X L, Xie C Q, Gao Y L, Zhao Z Q, Gu Y Q 2013 *Opt. Express* **21** 1473

[20] Greve M M, Vial A M, Stamnes J J, Holst B 2013 *Opt. Express* **21** 28483

Fabrication of self-standing binary Gabor zone plate and its single order diffraction*

Li Zhao-Guo¹⁾ Meng Ling-Biao¹⁾ Zhou Min-Jie¹⁾ Diao Kai-Di¹⁾ Yi Yong²⁾
Zhu Xiao-Li³⁾ Wu Wei-Dong¹⁾ Zhang Ji-Cheng¹⁾†

1) (Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

2) (School of Materials Science and Engineering, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China)

3) (Key Laboratory of Microelectronic Devices and Integration Technology, Institute of Microelectronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

(Received 29 September 2015; revised manuscript received 25 February 2016)

Abstract

The Gabor zone plate is an ideal zone plate with single focus spot, which has the potential applications in spectroscopy, X-ray imaging, etc. However, the Gabor zone plate is very difficult to prepare because of its sinusoidal transmission characteristic, thereby restricting its applications. Traditionally, the zone plate is prepared on the transparent substrate such as quartz glass, polyimide, etc. This restricts the applications of Gabor zone plates in the extreme ultraviolet and soft X-ray frequency band due to the strong absorption of quartz and polyimide in such bands.

In this work, we report a method of preparing the self-standing binary Gabor zone plate by using the focused ion beam direct writing. By combining the techniques of focused ion beam and chemical wet etching, the binary Gabor zone plate with self-standing and curved structure is fabricated. The main characteristic parameters of the Gabor zone plate are as follows: the diameter of 1400 μm , the radius of the first zone 90 μm , the outset zone number of 60, and a gold absorber thickness of 500 nm. The focusing properties of the self-standing binary Gabor zone plate are measured at different transfer distances with a 355 nm laser. The experimental results show that the high-order focus is removed with only the first-order focus spot reserved, and the focal distance is 2.28 cm, which is in agreement with the theoretical value of 2.41 cm. The self-standing Gabor zone plate is free from the influence of the substrate. Therefore, this kind of binary Gabor zone plate has potential applications in ultraviolet and soft X-ray regions.

Keywords: binary Beynon-Gabor zone plate, self-standing, diffraction property, focused ion beam direct writing

PACS: 42.79.Ci, 42.25.Fx, 81.16.Rf

DOI: 10.7498/aps.65.124207

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11404304, 60908023) and the National Key Scientific Instrument and Equipment Development Project of China (Grant No. 2014YQ090709).

† Corresponding author. E-mail: zhangjccaep@126.com