

微聚焦菲涅尔波带板聚焦特性研究*

董建军^{1)†} 曹磊峰¹⁾ 陈 铭¹⁾ 谢常青²⁾ 杜华冰¹⁾

1) 中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 绵阳 621900)

2) 中国科学院微电子研究所, 北京 100029)

(2007 年 7 月 17 日收到, 2007 年 8 月 19 日收到修改稿)

通过激光轰击 Ti 平面靶, 用微聚焦菲涅尔波带板做成像器, 测到了在放大倍数为 6.6 倍时 X 射线焦斑图像. 利用 Fresnel-Kirchhoff 衍射积分公式数值模拟了微聚焦菲涅尔波带板的点扩展函数. 模拟结果表明该微聚焦菲涅尔波带板在两倍焦距处强聚焦. 改变物距和像距但保持透镜的物像距公式, 也可得到类似的结果. 模拟和实验表明微聚焦波带板可以应用于 X 射线点对点成像, 实现激光等离子体 X 射线高空间分辨成像.

关键词: 菲涅尔波带板, Fresnel-Kirchhoff 衍射, 数值模拟, 点扩展函数

PACC: 5270, 0660J, 7870D

1. 引 言

在 ICF 激光等离子体诊断中, X 射线空间诊断是很重要的一种诊断手段, 传统的空间分辨元件一直是针孔、狭缝. 随着诊断精确性的要求, 这种孔阑元件的空间分辨已不能满足物理实验的需求, 迫切需要发展高空间分辨的成像元件. 微聚焦菲涅尔波带板是一种应用于 X 射线波段的高空间分辨成像元件, 其空间分辨率与波带板的最外环宽有关, 理论上波带板的瑞利分辨率为最外环宽的 1.22 倍^[1]. 波带板能将 X 射线聚焦到几十个纳米^[2], 是高空间分辨 X 射线显微术^[3]中的核心元件. 目前国内波带板的加工水平为最外环宽 100 nm 左右, 高宽比可做到 8:1^[4]. 利用重叠纳米加工技术国外最好可做到最外环为 15 nm 左右, 其空间分辨率做到了 15 nm^[5]. 波带板也应用于惯性约束聚变(ICF)空间诊断, 一类应用是将菲涅尔波带板用作编码元件^[6-8], 对 X 射线源成编码像然后通过一定的手段复原出源的图像; 另外一种应用就是直接利用菲涅尔波带板的聚焦特性在 X 射线波段实现点对点成像^[9]. ILE 的日本学者利用位相波带板成功获得了激光等离子体密度轮廓图像^[10, 11], 这表明微聚焦菲涅尔波带板可以像传统意义上的透镜一样在 X 射线波段实现点物成点像.

2. 微聚焦波带板点扩展函数数值模拟

波带板可以视为一种圆形光栅, 因而也有多级衍射现象, 如图 1 所示. 在平面单色波入射情况下且波带板是理想的, 各衍射级能量分配^[1]为: 直通占 25%, ± 1 级各占 10%, 其他级占 1%. 表 1 是中科院微电子所制作的 544 环, 最外环宽为 150 nm 微聚焦菲涅尔波带板的主要参数. 我们利用 Fresnel-Kirchhoff 衍射积分公式(1)对此波带板的点扩展函数作了定性模拟. 在极坐标下对波带板平面进行离散化, 并在每个离散小区域利用泰勒展开取一级近似, 可以对该小区域 Fresnel-Kirchhoff 衍射积分公式(1)进行解

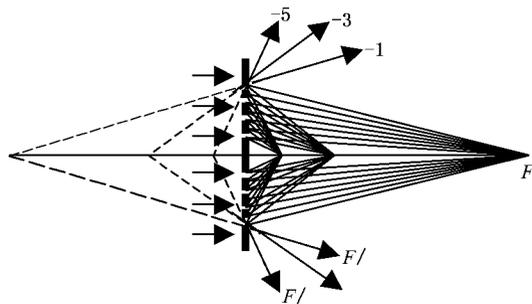


图 1 菲涅尔波带板多级衍射焦点示意图(其中 F 为一级焦距, -1 代表负一级衍射)

* 国家高技术研究发展计划(批准号: 2006AA843070)资助的课题.

† E-mail: dd_dragonfly@163.com

析求解.

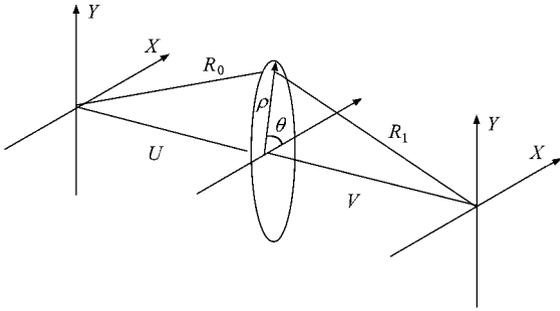


图2 模拟菲涅尔波带板点扩展函数光路示意图(R_0 代表点源到波带板平面的距离, R_1 代表像面上任意一点到波带板平面的距离, U 和 V 分别代表物距和像距, 且满足 $1/U + 1/V = 1/F$, 波带板平面采用极坐标表示)

如图2所示的光路, Fresnel-Kirchhoff 衍射积分公式可表示为

$$E(x, y) = \frac{-i}{\lambda} \iint_{\Sigma} T(\xi, \eta) \frac{e^{ikR_1} e^{ikR_0}}{R_1 R_0} d\xi d\eta, \quad (1)$$

$$E(x, y) = \int_{\lambda_2}^{\lambda_1} P(\lambda) \left[\frac{-i}{\lambda} \iint_{\Sigma} T(\xi, \eta) \times \frac{e^{ikR_1} e^{ikR_0}}{R_1 R_0} d\xi d\eta \right] d\lambda, \quad (2)$$

其中(1)式中 $T(\xi, \eta)$ 为菲涅尔波带板的透过率, 对

二值化波带板可以表示为

$$T(\xi, \eta) = \begin{cases} 1, & r_{2n-2} \leq \sqrt{\xi^2 + \eta^2} \leq r_{2n-1}, \\ n = 1, 2, \dots, \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

其中 r_n 表示波带板第 n 环半径, (ξ, η) 表示波带板上一点坐标. (2)式表示, 点源具有 $P(\lambda)$ 的谱分布时的衍射振幅, 这里没有考虑波带板材质对相位的影响, 且认为波带板无限薄. 波带板参数设置取表1中的数据, 模拟的结果如图3所示. 从图3(a)中可以看出偶数级的衍射效率为零, 且奇数级次越高, 聚焦情况越好, 这与菲涅尔波带板理论符合^[1], 从而也证明了我们的模拟方法是正确的. 图3(a)模拟的是点源在光轴上的情况, 为了考察点源处于不同视场成像情况, 模拟了点源在物面上处于 X 轴不同位置时像面强度沿 X 轴的分布, 如图4所示. 从图4可以清楚地看到, 物面上一点对应像面上的一点, 即我们熟知的物象共轭点. 例如物点 $(4.8, 0, -U)$ 在像面的对应点的坐标大约在 $(-48, 0, V)$, 正好符合放大倍数 $M = 10$ 的条件, 而且像点位置也正确, 所以模拟定性说明了波带板能够实现点到点成像, 与可见光中的透镜类似. 但这种点到点成像只在小视场范围内成立, 我们知道可见光透镜成像, 离轴越远的光线几何像差也越大, 这说明波带板点到点成像也只适合近轴光线.

表1 中科院微电子所制作的最外环宽 150 nm 菲涅尔波带板参数

工作波长/nm	直径/ μm	总环带数	最内环半径/ μm	最外环宽度/nm	Au 吸收体厚度/nm	第一级焦距/mm
0.2756	326	544	7	150	900	177.8

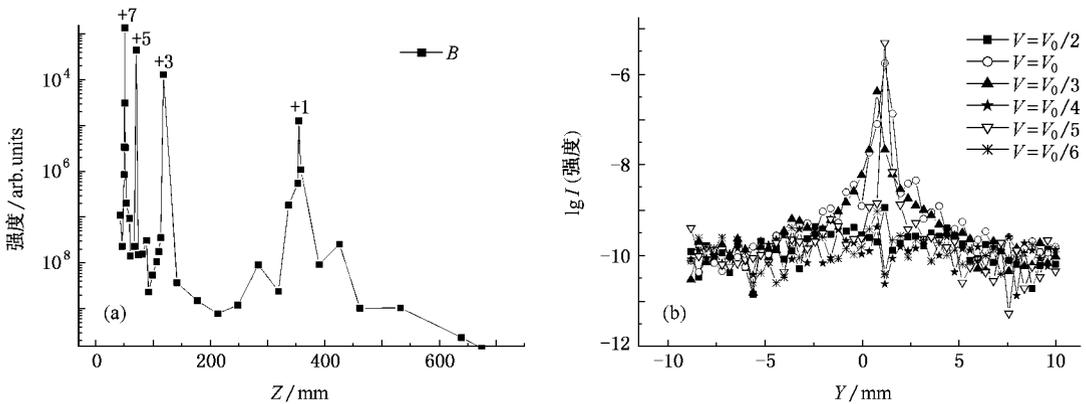


图3 (a)点源通过菲涅尔波带板沿光轴的强度分布 (b)点源在像平面横向分布(波带板第一级焦距 $F = 177.8 \text{ mm}$ (对 Ti 的特征线 4.7 keV) 模拟波带板环数 544 环, 最外环宽 150 nm, 物距和像距均为 $2F$)



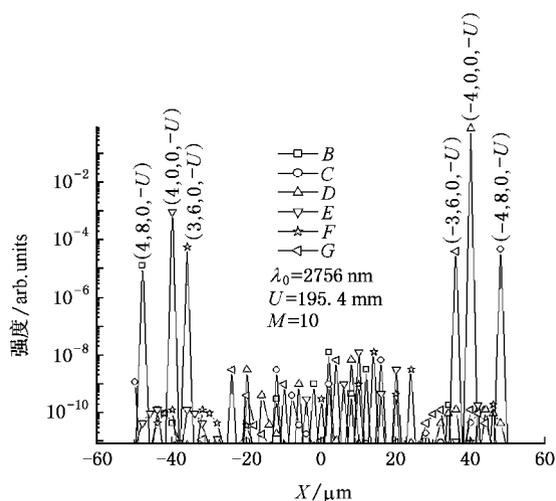


图4 点源在物面 X 轴不同位置时像面强度分布(物距 $U = 195.4 \text{ mm}$, 放大倍数 $10\times$, 波带板第一级焦距 $F = 177.8 \text{ mm}$ (对 Ti 的特征线 4.7 keV) 图中竖排括号里的数字表示点源的坐标(坐标原点在波带板的中心))

3. 微聚焦波带板 X 射线成像实验

由于微聚焦波带板理论上的空间分辨率很高，

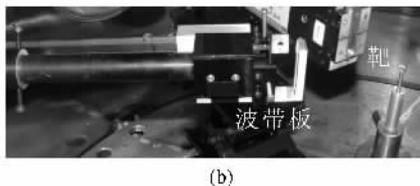
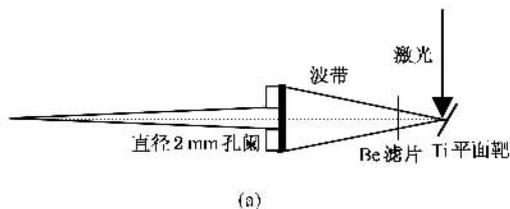


图5 激光能量 6 J , 脉宽 1 ns , 基频 $1.06 \mu\text{m}$, $10 \mu\text{m}$ 厚 Ti 平面靶, 激光与靶面法线成 45° 入射, 前置 $30 \mu\text{m}$ 厚的 Be 滤片, 紧贴波带板后放置厚度为 $20 \mu\text{m}$ 钼片, 中心开直径 2 mm 小孔, 记录设备 $2048 \times 2048 \text{ X}$ 射线 CCD, 像素 $13 \mu\text{m}$. 波带板到靶的距离 215 mm , 靶到 X 射线 CCD 灵敏面的距离大约 1625 mm , 放大倍数 $6.6\times$ (a) 激光打靶波带板成像光路示意图 (b) 菲涅尔微聚焦波带板成像系统

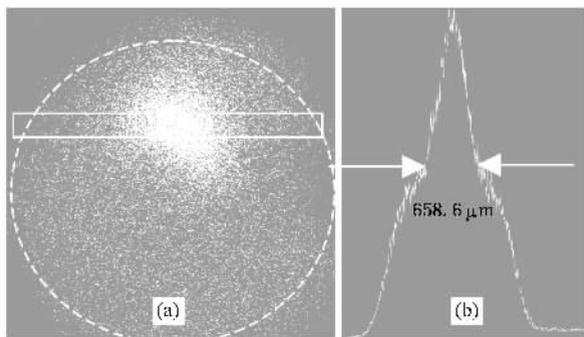


图6 (a) 在激光打靶装置上获得的实验结果 (b) 横向扫描的 X 射线斑轮廓

一般为波带板最外环的 1.22 倍, 以表 1 中给出的数据计算, 这种波带板的空间分辨可以达到 $0.2 \mu\text{m}$ 左右, 可以实现亚微米分辨, 但实际应用中, 尤其在激光等离子体 X 射线诊断应用中, 影响波带板空间分辨的因素很多, 诸如光源的单色性、物像距的精度, 波带板制作精度, 吸收体的材料厚度以及波带板的高宽比等等. 为了考核应用在激光等离子体 X 射线诊断的微聚焦波带板的聚焦性能, 在激光打靶装置上进行了波带板 X 射线成像实验. 实验光路和成像系统实物以及实验条件如图 5 所示.

从图 6(a) 中可以看出, 虚线圈就是置于波带板后的直径 2 mm 小孔所成的像, 靠近虚线圈上部的亮斑就是激光轰击 Ti 平面靶产生的 X 射线斑通过波带板所成的图像, 其半高宽可由图 6(b) 得出, 虚线圈所包围的阴影区域为直穿 X 射线所形成, 其直径反推到波带板面约为 2.2 mm , 与放置于波带板后的小孔光阑的直径相符.

4. 结 论

通过数值模拟波带板对点源的成像和 X 射线成像实验的研究, 表明菲涅尔微聚焦波带板在 X 射线波段具有很好的聚焦性能, 初步的实验证实了微聚焦波带板在激光等离子体 X 射线成像诊断中可实现点到点成像, 可以作为 X 射线高空间分辨诊断元件. 通过提高波带板的质量, 控制影响分辨的各类不利因素, 微聚焦波带板有望在激光等离子体 X 射线亚微米空间分辨成像中获得广泛应用.

- [1] David A 1999 *Soft X-ray and extrem ultraviolet radiation : Principle and Applications*(Cambridge University Press) chapter9 334
- [2] Comamala J ,Borrise X ,Perez-Murano F ,Campos J ,Ferrer S 2006 *Microelectronic Engineering* **83** 1355
- [3] Nieman B ,Rudolph D ,Schmahl G 1974 *Opt. Commun.* **12** 160
- [4] Wnag D Q 2006 *Doctor degree thesis*(Institute of Microelectronics , Chinese Academy of Sciences)chapter4 63(in Chinese) [王德强 2006 博士学位论文(中科院微电子研究所)第四章第 63 页]
- [5] Chao W L ,Harteneck B D ,Alexander Liddle J ,Anderson E H , Attwood D T 2005 *Nature* **435** 1210
- [6] Gajendra Singh Solanki 2004 *J. Opt. Soc. Am. A* **21** 517
- [7] Ten H ,Yang X D ,Feng J ,Cheng J B ,Cheng J X ,Zheng Z J 2000 *High power laser and Particle Beams* **12** 707 (in Chinese) [藤 浩、杨向东、冯 杰、陈家斌、成金秀、郑志坚 2000 强激光与粒子束 **12** 707]
- [8] Ten H ,Cao L F ,Cheng J X ,Chen J B ,Yang X D ,Liu Z L ,Zheng Z J 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 835 (in Chinese) [藤 浩、曹磊峰、成金秀、陈家斌、杨向东、刘忠礼、郑志坚 2002 物理学报 **51** 835]
- [9] Pfeiffer F ,David C 2006 *Phy. Rev. B* **73** 245331-1
- [10] Hiroshi Azechi ,Yohei Tamari ,Hiroyuki Shiraga 2003 *Institute of Laser Engineering Osaka University Annual Reports* chapter2 100
- [11] Yoshio Suzuki , Akihisa takeuchi , Hidekazu Takano , Hisataka Takenaka 2005 *Japanese Journal of Applied Physics* **44** 1994

Study on the focus performance of micro-focus Fresnel zone plate *

Dong Jian-Jun^{1)†} Cao Lei-Feng¹⁾ Chen Ming¹⁾ Xie Chang-Qing²⁾ Du Hua-Bing¹⁾

1) *Leaser Fusion Research Center ,Chinese Academy of Engineering Physics ,Mianyang 621900 ,China*

2) *Institute of Microelectron ,Chinese Academy of Sciences ,Beijing 100029 ,China*

(Received 17 July 2007 ; revised manuscript received 19 August 2007)

Abstract

The performance of micro-focus Fresnel zone plate(MFZP) with the outermost width of 150 nm is tested using the Ti spectral line. Experimental data indicates that the image of pinhole with diameter of 12.5 μm fully responses to a pixel of the X-ray CCD camera. Furthermore ,the X-ray focal spot is tested with a magnification of 6.6 by using laser striking the Ti planar target. The MFZP 's point spread function is simulated with the integral formula of Fresnel-Kirchhoff diffraction. The simulated results indicate that the MFZP strongly focuses at double foci. The same results are obtained when the object distance and image distance change but keeping the relation of the lens unchanged. The simulation and the experiment indicate that MFZP can be applied to point-to-point imaging of X-ray to realize high spatial resolution imaging for the laser plasmas.

Keywords : Fresnel zone plate , Fresnel-Kirchhoff diffraction , numerical simulation , point spread function

PACC : 5270 , 0660J , 7870D

* Project support by the National High Technology Development Program of China(Grant No. 2006AA843070).

† E-mail : d _ dragonfly@163 . com