

# 使用二元相位菲涅尔波带片产生轴向线聚焦\*

李玉同<sup>1)</sup> 张 杰<sup>1)</sup> 鲁 欣<sup>1)</sup> 金 展<sup>1)</sup> D. A. Pepler<sup>2)</sup> C. N. Danson<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>中国科学院物理研究所光物理实验室, 北京 100080)

<sup>2)</sup>CLRC Rutherford Appleton Laboratory, Chilton, Didcot, OXON, OX11 0QX, UK)

(2004 年 3 月 24 日收到, 2004 年 10 月 12 日收到修改稿)

介绍了一种全新的轴向线聚焦方案. 采用菲涅尔波带片, 在实验中产生了沿轴向长为 5mm, 宽 100 $\mu$ m 的线聚焦. 光学测量表明, 线聚焦轴向强度分布比较均匀. 这些参数基本上可以满足激光等离子体实验的要求.

关键词: 菲涅尔波带片, 轴向线聚焦

PACC: 4215E, 4255V

## 1. 引 言

在 x 射线激光实验中, 需要使用线聚焦产生线状等离子体柱, 使 x 射线自发辐射 (ASE) 在等离子体中得到放大<sup>[1,2]</sup>. 在传统的纳秒抽运激光产生 x 射线激光实验中, 一般采用离轴反射式和单柱面镜或列阵柱面镜产生线聚焦, 这两种方法得到的线聚焦和入射激光轴垂直.

皮秒和飞秒激光技术的发展, 使原本只能在大型激光装置上进行的 x 射线激光实验小型化成为可能. 但由于采用的激光脉冲宽度很短, 须采用行波抽运方式<sup>[3]</sup>. 近几年有人提出了纵向抽运方案<sup>[4]</sup>, 此方案和气体中的光电离方案<sup>[5]</sup>均需在激光轴向聚焦入射的抽运激光.

产生沿光学系统轴向线聚焦的传统方法是利用锥镜聚焦光束<sup>[6]</sup>. 大口径锥镜造价高, 产生的线聚焦强度不均匀, 而且线聚焦长度固定. 在 x 射线激光实验中, 需要改变线聚焦长度, 此时锥镜不能满足要求. 二元相位波带片曾被用来改善激光辐照均匀性<sup>[7,8]</sup>. 本文介绍一种利用二元相位菲涅尔波带片产生轴向线聚焦的新方法.

## 2. 设计原理

菲涅尔波带片焦距长度  $f_z$  可表示为

$$f_z = \pm \frac{1}{n} \left( \frac{R_0^2}{\lambda} - \frac{\lambda}{4} \right), \quad (1)$$

这里  $n$  为折射率,  $R_0$  为中心带半径,  $\lambda$  为波长. 为简单起见, 将菲涅尔波带片看成是焦距为  $f_z$  的透镜. 很明显, 通过改变中心带半径  $R_0$ , 可以对波带片焦距进行调节. 图 1 是一个具有 6 个焦点的复合波带片示意图, 该波带片被分成 6 个 60° 扇面, 每个扇面对应一个焦点. 很明显, 如果使半径  $R_0$  连续变化, 就可以得到沿轴向的线聚焦.

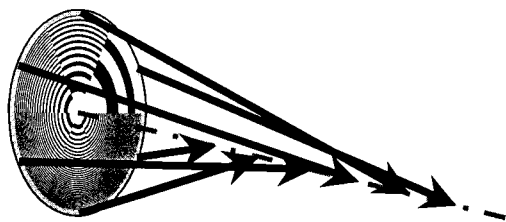


图 1 复合菲涅尔波带片示意图 (图中光线表示正一阶衍射焦点位置)

根据以上原理, 可以设计出和一般聚焦透镜组合使用的线聚焦波带片. 设透镜焦距为  $f_l$ , 待设计线聚焦复合系统 (由透镜和波带片组成) 焦距为  $f_c$ , 则有

$$\frac{1}{f_c} = \frac{1}{f_z} + \frac{1}{f_l}. \quad (2)$$

由 (1) 式可知, 波带片的负阶衍射形成透镜主焦点内的线聚焦, 正阶衍射形成主焦点外的线聚焦. 要产生长

\* 国家自然科学基金 (批准号: 10204023, 10374115, 10335020, 10105014, 10390160) 国家高技术惯性约束聚变基金和高能高密度等离子体物理国防科技重点实验室资助的课题.

† E-mail: ytli@aphy.iphys.ac.cn.

度为  $L$  的线聚焦,即主焦点前后长为  $L/2$  的线聚焦 ( $f_l \pm L/2$ ),由(2)式可计算出相应的  $f_z$ . 比如要产生在 800nm 波长、和 90mm 透镜配合使用的长 5mm 的线聚焦,就要求波带片的  $f_z$  最小长度为  $\pm 6$ mm,此值对应的两个焦点是线聚焦的外端点,分别位于主焦点两侧  $\pm 2.5$ mm. 从理论上讲,要产生所需线聚焦,要求  $f_z$  从此最小值连续变化到无穷大. 而实际上,由于波带片制作工艺,总会有零级泄漏,这种泄漏正好填充了线聚焦中心的光强. 所以在实际中设计线聚焦时,线聚焦内侧起点取在距主焦点几百微米即可. 这样即可计算出  $f_z$  的范围,进而得到波带片半径  $R_0$  的范围. 比如线聚焦内侧端点取在距主焦点  $\pm 200\mu\text{m}$  处,则最大  $f_z$  为  $\pm 78$ mm. 因此,长度为 5mm 的线聚焦对应的波带片半径为 2.2mm—7.9mm.

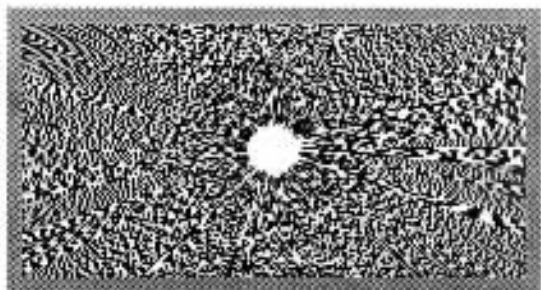


图 2 菲涅尔波带片形貌图

按照上面的设计,光轴上每一点处的光强都是与光轴垂直的平面内整个光束塌缩而成,这就导致该点焦斑呈尖瓣形. 所以要得到具有实际意义的线聚焦,波带片半径不能采用平滑过渡,而须采用随机过渡,以去除焦斑处的尖瓣. 图 2 是最终制作波带片形貌,该波带片是由众多具有随机焦距的  $1.5^\circ$  扇面组成(但随机焦距值仍保持在最大  $f_z$  和最小  $f_z$  之间).

### 3. 实验测量结果

我们采用 800nm 超短脉冲激光器对波带片产生的线聚焦进行了测量. 该激光器平均功率 1.1W,脉冲宽度 100fs,重复频率 82MHz. 实验中分别使用了焦距 90mm 和 125mm 两种透镜. 入射激光束直径 8mm. 透镜将激光束直接聚焦到一个  $512 \times 512$  像元、16 比特 CCD 光敏面上,单个像元尺寸为  $24\mu\text{m} \times 24\mu\text{m}$ . 沿轴向改变透镜位置,可得到一系列在焦点附近的光束截面像. 分析这一系列截面图像,可得到

线聚焦的各项参数. 图 3(a) 是一幅在透镜 ( $f_l = 125\text{mm}$ ) 最佳焦点处的线聚焦截面图, (b) 是横向通过焦点的强度扫描曲线. 波带片安放在透镜前 30mm 处. 可见当采用焦距 125mm 的聚焦透镜时,在主焦点处的线聚焦底宽约为  $100\mu\text{m}$ . 此外,我们还注意到,加上波带片后,中心亮斑周围一定空间内的强度值被大大加强,由没有波带片时的 100 增大到 5000 左右. 这表明有相当部分的激光能量被衍射或散射到中心亮斑周围. 为了确定波带片的可聚焦能量效率,利用 CCD 图像采集和数据处理软件 (Winview), 我们对主焦点处的二维强度分布进行了积分,通过比较有、无波带片时的总强度值,得出实验使用的波带片能量聚焦效率约为  $40\% \pm 10\%$ ,即入射激光能量的 40% 对线聚焦有直接贡献,而其余能量被分散到了中心亮斑周围的空间.

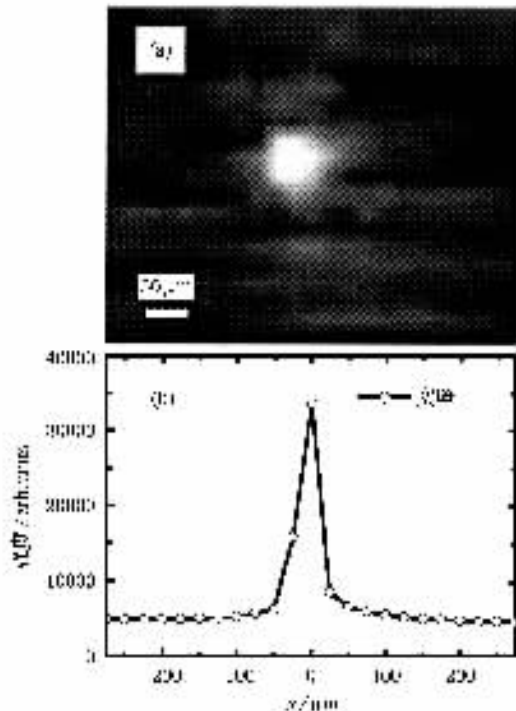


图 3 (a) 在透镜主焦点位置处的线聚焦焦斑截面; (b) 在焦斑处沿水平方向的强度扫描曲线,底宽约  $100\mu\text{m}$

图 4 给出了焦距 125mm 透镜和波带片复合系统产生的线聚焦二维强度分布. 激光从左侧入射. 图 (a) 对应不加波带片的情况,图 (b) 对应将波带片安放在透镜前的情况. 横轴是线聚焦轴向空间位置,主焦点位于 14.5mm 处. 纵轴是焦线宽度,单位是 CCD 像元数. 很明显,加上波带片后,在主焦点前后的确形成了长度约为 5mm 的线聚焦.

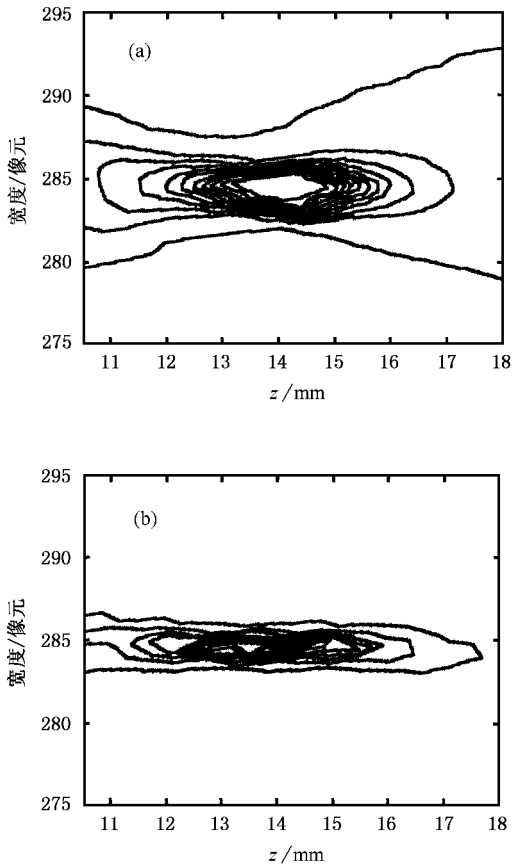


图4 波带板产生的线聚焦强度的二维分布 (a)为没有波带板的情况 (b)为将波带板放在透镜前的情况(透镜焦距 125mm)

我们分别分析了线聚焦在  $50\mu\text{m} \times 50\mu\text{m}$  (4 个像元) 和  $75\mu\text{m} \times 75\mu\text{m}$  (9 个像元) 截面内光强沿轴向 ( $Z$ ) 的分布, 图 5 给出了波带片安装在透镜前的实验分析结果. 实线对应  $50\mu\text{m} \times 50\mu\text{m}$  截面强度分布, 虚线对应  $75\mu\text{m} \times 75\mu\text{m}$  截面强度分布. 可见, 加上波带片后, 沿轴向的光强分布得到了明显改善. 在主焦点前后 2.5mm 范围内, 光强分布比较均匀, 只是在线聚焦两端强度下降为中间的 50%. 线聚焦长度和理论符合得很好.

在  $x$  射线激光实验中, 需要改变线聚焦长度, 菲涅尔波带片可以做到这一点. 从 (2) 式可见, 改变焦距透镜的焦距, 就可调节线聚焦长度. 图 6 是波带片和焦距 125mm (实线) 及 90mm 透镜 (虚线) 配合使用得到的线聚焦宽度 (底宽) 随透镜轴向位置的变化. 可见, 随着透镜焦距变短, 线聚焦长度也按比例相应变短, 由使用 125mm 透镜的 5mm 长缩短为 90mm 透镜的 3.5mm 左右. 在实际实验中, 焦距透镜调好后一般不宜再调节. 菲涅尔波带片可以在不换透镜的情况下达到改变线聚焦长度的目的. 具体做法是在

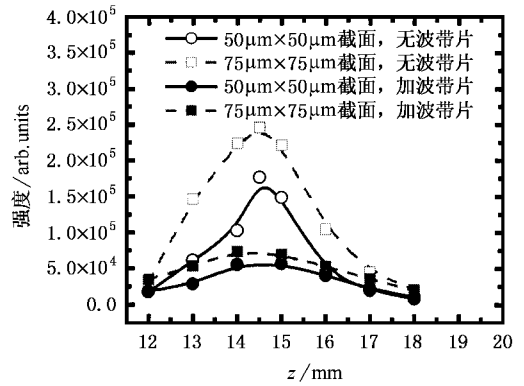


图5 将波带板安放在透镜前所测的线聚焦强度与没有波带板情况的对比(透镜焦距为 125mm)

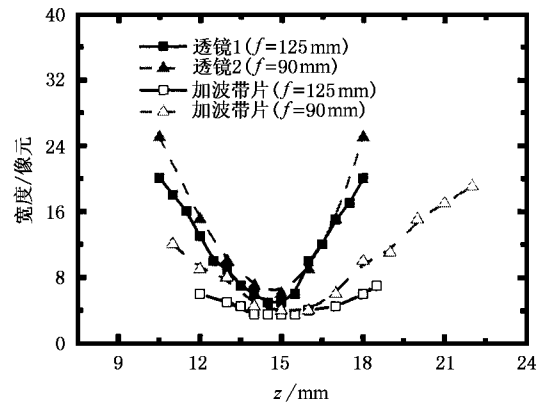


图6 采用不同焦距的透镜测量结果(方形为  $f=125\text{mm}$  情况, 三角形为  $f=90\text{mm}$  的情况, 波带板都放在透镜前)

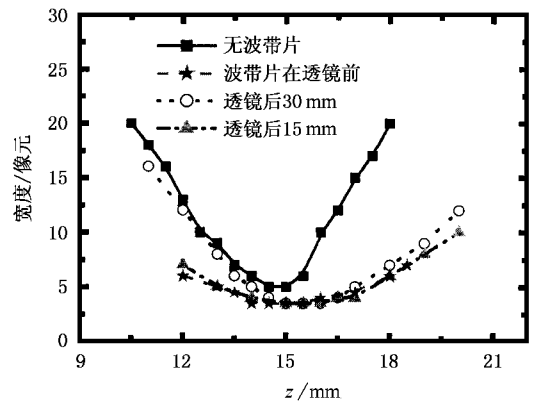


图7 将波带板安放在透镜后 30mm (点线) 15mm (虚点线) 和安放在透镜前 (虚线) 所测的线聚焦宽度与没有波带板情况 (实线) 的宽度对比(透镜焦距为 125mm)

实验中将波带片安放在透镜后的不同位置, 就可得到不同长度的线聚焦. 图 7 是几种情况的比较. 波带

片安放在透镜后 15mm 处(虚点线)的线聚焦宽度比放在透镜前(虚线)略大,但当距透镜的距离增大到 30mm(点线)时,线聚焦长度明显缩短.所以在实际使用中,可根据需要,将波带片安放在不同位置,以得到不同长度的线聚焦.这一点比使用锥镜产生轴向线聚焦要灵活得多.

虽然通过波带片产生了所期望的线聚焦,但由图 3 可知,在线聚焦周围存在散射光强分布,其信噪比约为 7:1.这在以后的设计中需要改进.

## 4. 结 论

我们采用菲涅尔波带片法,产生了沿光学系统

轴向长约 5mm、宽约  $100\mu\text{m}$  的线聚焦(使用 125mm 的主聚焦透镜),这是一种全新的线聚焦产生方法.光学测量表明,线聚焦轴向强度分布比较均匀,效率为  $40\% \pm 10\%$ .通过改变聚焦透镜的焦距或者改变波带片安放位置,可以得到不同长度的线聚焦.这些基本上可以保证激光等离子体实验的要求.

感谢光物理实验室激光运行组的大力支持.

- [ 1 ] Li Y Y , Zhang J and Teng A P 2001 *Chin. Phys.* **10** 516  
 [ 2 ] Yan F and Zhang J 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 2524 ( in Chinese )  
 [ 燕 飞、张 杰 2002 物理学报 **51** 2524 ]  
 [ 3 ] Moreno J C , Nilsen J and Da Silva L B 1995 *AIP Conf. Proc.* **332** 21

- [ 4 ] Li R , Ozaki T , Kanai T and Kuroda H 1998 *Phys. Rev. E* **57** 7093  
 [ 5 ] Sebban S *et al* 2001 *Phys. Rev. Lett.* **86** 3004  
 [ 6 ] McLeod J H 1960 *Journal of the Optical Society of America* **50** 166  
 [ 7 ] Stevenson R M *et al* 1994 *Optics Letters* **19** 363  
 [ 8 ] Bett T H *et al* 1995 *Applied Optics* **34** 4025

# Generation of axial line-focus using a binary-phase Fresnel zone plate<sup>\*</sup>

Li Yu-Tong<sup>1)</sup> Zhang Jie<sup>1</sup> Lu Xin<sup>1)</sup> Jin Zhan<sup>1)</sup> D. A. Pepler<sup>2)</sup> C. N. Danson<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>*Laboratory of Optical Physics, Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China*

<sup>2)</sup>*CLRC Rutherford Appleton Laboratory, Chilton, Didcot, OXON, OX11 0QX, UK*

( Received 24 March 2004 ; revised manuscript received 12 October 2004 )

## Abstract

In this paper, a uniform axial line-focus, which is important for the x-ray laser amplification pumped by picosecond and femtosecond laser pulses, is generated by a binary-phase Fresnel zone plate. The performances of the plate are tested using a ultrashort-pulse laser. The results show that the length and the width of the line-focus are  $\sim 5\text{mm}$  and  $\sim 100\mu\text{m}$  respectively, when coupled with a 125mm focal length lens. The ratio of the peak intensity at the center of the line focus to the intensity outside around the line focus is 7 : 1.

**Keywords** : Fresnel zone plate, axial line-focus

**PACC** : 4215E, 4255V

<sup>\*</sup> Project supported by the National Natural Science Foundation of China ( Grant Nos. 10204023, 10374115, 10335020, 10105014, and 10390160 ), the National High-Tech ICF program, and National Key Laboratory of High Temperature and High Density Plasma.