

光源尺寸和光谱带宽对波带板成像的影响

陆中伟 王晓方

Influence of source size and spectral bandwidth on the imaging of a zone plate

Lu Zhong-Wei Wang Xiao-Fang

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 68, 035202 (2019) DOI: 10.7498/aps.68.20181236

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.68.20181236>

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

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

Fresnel波带片编码成像的高分辨重建

High-resolution reconstruction of Fresnel zone plate coded imaging

物理学报. 2017, 66(5): 054203 <https://doi.org/10.7498/aps.66.054203>

Gd靶激光等离子体6.7nm光源的实验研究

Experimental research on laser-produced Gd target plasma source for 6.7 nm lithography

物理学报. 2015, 64(23): 235202 <https://doi.org/10.7498/aps.64.235202>

基于柱弥散光源体内辐照的前列腺扫描光声成像仿体实验

Phantom experimental photoacoustic scanning imaging of prostate based on internal light irradiation using cylindrical diffusing source

物理学报. 2015, 64(20): 207801 <https://doi.org/10.7498/aps.64.207801>

先进微波成像诊断技术中高通滤波板的优化设计

Optimization design of dichroic plate for the advanced technology in microwave imaging diagnostic

物理学报. 2015, 64(16): 165202 <https://doi.org/10.7498/aps.64.165202>

局域共振型加筋板的弯曲波带隙与减振特性

Flexural wave band gaps and vibration reduction properties of a locally resonant stiffened plate

物理学报. 2016, 65(17): 176202 <https://doi.org/10.7498/aps.65.176202>

光源尺寸和光谱带宽对波带板成像的影响

陆中伟 王晓方[†]

(中国科学技术大学工程与应用物理系, 合肥 230026)

(2018年6月26日收到; 2018年11月24日收到修改稿)

X射线菲涅耳波带板成像能够实现亚微米空间分辨能力, 有可能应用于激光等离子体或聚变靶的高分辨X射线成像诊断. 之前的数值模拟研究表明, 成像分辨能力受光源尺寸、入射光或成像光谱带宽的影响. 本文报道在632.8 nm为中心波长的可见光波段, 对波带板成像的数值模拟和原理性验证实验. 数值模拟表明: 随着扩展光源尺寸增加, 视场中央分辨能力基本不变, 而像对比度下降; 随着成像的光谱带宽的增加, 视场中央分辨能力与像对比度同时下降. 实验证实了数值模拟的结论, 且实验与数值模拟结果的定量比较也符合得较好.

关键词: 波带板成像, 扩展光源, 激光等离子体**PACS:** 52.70.-m, 42.79.Ci, 52.57.-z**DOI:** 10.7498/aps.68.20181236

1 引言

激光驱动核聚变使用高能激光或激光产生的X射线内爆聚变靶丸, 使其近等熵压缩达到劳森(Lawson)判据条件, 产生热核聚变释放能量^[1]. 在激光烧蚀与压缩过程中, 可能出现流体力学不稳定性, 降低压缩效率. 此外, 烧蚀区的密度分布对于能量输运等过程也有重要影响. 为了诊断流体力学不稳定性或烧蚀区, 实验常采用keV量级的X射线对靶丸放射照相, 通过对透射X射线成像来诊断靶丸. 鉴于流体力学不稳定性的初始扰动波长与烧蚀区等界面宽度的特征尺度在1 μm量级, 而靶丸尺度约1 mm, 发展X射线成像诊断的一个目标是实现1 mm尺度视场、1 μm高空间分辨能力^[1,2].

当前的X射线成像诊断主要基于针孔成像^[3,4]和反射镜成像^[5-8]. 针孔成像的分辨能力与针孔直径大小相当, 最好为5 μm左右^[3,4]. 反射镜成像的理论空间分辨能力能达到1 μm或更好, 不过受掠入射像散等影响, 实际获得的最好空间分辨能力为2-3 μm, 视场为几百微米^[5-8].

X射线菲涅耳波带板(FZP)成像基于衍射光

学, 空间分辨能力可达到衍射极限. 在同步辐射光源等X射线束线站上, 入射光单色性好, 样品(或视场)尺寸通常不超过几个微米, FZP成像一个主要指标是衍射极限空间分辨能力, 实验已达到10 nm左右^[9]. 有别于此, 在聚变靶等激光等离子体的研究中, 靶具有较大尺寸(约100 μm-1 mm), 而物理过程的特征尺度在1 μm量级. 因此, FZP应用于激光等离子体的keV量级X射线成像要能够实现大视场成像, 又能够保证适当空间分辨能力(约1 μm), 而不必要求衍射极限分辨能力. 当FZP采用正入射方式成像时, 可以最大程度地克服像差, 实现大视场、高空间分辨成像^[10,11]. 尽管如此, 法国、日本等国外一些实验室曾研究FZP对激光等离子体X射线源的成像, 实验结果并不理想. 法国原子能和替代能源委员会(CEA)对400 μm-1 mm尺寸源成像, 获得了4 μm的分辨能力^[12]. 日本大阪大学激光工程研究所在激光等离子体X射线背光照相实验中, 对70 μm尺寸源成像获得近2 μm的分辨能力^[13]. 国内, 中国工程物理研究院也开展过初步实验研究^[14]. 这些实验研究所获得的分辨能力都明显差于所用FZP的理论分辨能力, 原因并

[†] 通信作者. E-mail: wangl@ustc.edu.cn

未明确^[12-14].

为了确认分辨能力下降的原因,我们曾根据激光等离子体 X 射线光谱和聚变靶等特点,数值模拟了 FZP 成像时物的尺寸、入射光和成像光谱带宽对成像空间分辨能力的影响^[15,16],能较好地解释之前的实验结果^[12-14].由于 FZP 成像对光谱带宽有要求,而当前使用激光等离子体产生单色或窄光谱带宽的 X 射线光谱仍较为困难^[17,18],难以使用激光等离子体 X 射线源开展 FZP 成像实验与数值模拟结果进行比对.本文使用与 X 射线 FZP 成像相同的成像理论和数值模拟方法^[15,16],在可见光波段给出 FZP 对扩展光源成像的数值模拟结果,并进行了原理性验证实验.这些结果支持 X 射线 FZP 成像模拟的有关结论,可为发展 X 射线 FZP 高分辨成像诊断提供参考.

2 FZP 成像的原理和数值模拟方法

FZP 对扩展光源成像的原理如图 1 所示.光轴(图中 z 轴)垂直并通过 FZP、扩展光源(物)、像的中心.在数值模拟成像时,基于激光等离子体的性质设置扩展光源为非相干的.在模拟扩展光源的成像时,对扩展光源进行离散化处理,将其分割为很多足够小的区域,将每一个小区域近似为一个点光源.点光源成像的复振幅分布由菲涅耳-基尔霍夫衍射公式得到^[19]:

$$U_\lambda(x, y) = -\frac{iA(x_0, y_0)}{2\lambda} \iint_S \frac{t(Q)e^{ik(r+s)}}{rs} [\cos(\hat{n}, \hat{r}) + \cos(\hat{n}, \hat{s})] dS, \quad (1)$$

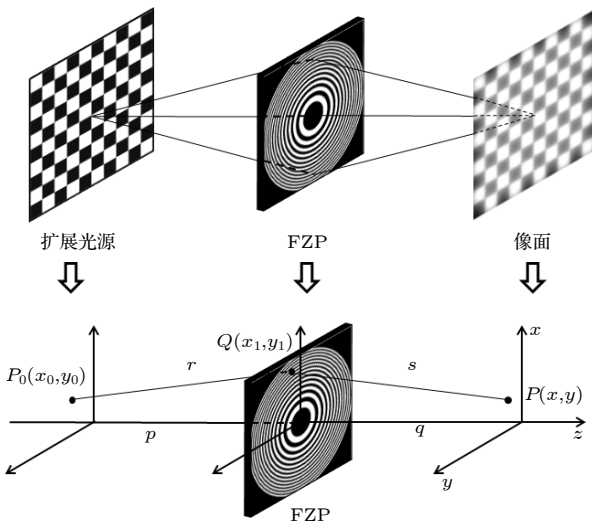


图 1 FZP 成像示意图

Fig. 1. Schematic diagram for FZP's imaging.

式中, $A(x_0, y_0)$ 为点源 P_0 的复振幅; r 为点源 P_0 到 FZP 上一点 Q 的距离; s 为 Q 点到成像面上一点 P 的距离; λ 和 k 分别为点源发射的波长及其波矢数; S 为波带板平面区域; $t(Q)$ 为 FZP 的透过率函数; (\hat{n}, \hat{r}) 和 (\hat{n}, \hat{s}) 分别为 FZP 法线方向与物方波矢和像方波矢的夹角.

实际应用中,点源和像点都靠近光轴,有 $(\hat{n}, \hat{r}) \approx 0$, $(\hat{n}, \hat{s}) \approx 0$, 且 r, s 对点源 P_0 , 次波源 Q 发出的球面子波在 P 点的振幅影响不大,可取振幅中 $r \approx p$, $s \approx q$. 这里 p 和 q 分别为物点到 FZP 平面的垂直距离.但是复指数中 r, s 的变化对相位的影响不能忽略,因此 (1) 式可以简化为

$$U_\lambda(x, y) = -\frac{iA(x_0, y_0)}{\lambda} \iint_S \frac{t(Q)e^{ik(r+s)}}{pq} dS, \quad (2)$$

式中 p, q 分别是物距与像距,满足 FZP 成像公式 $\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \frac{1}{f}$, f 为 FZP 的主焦距.

在离轴一定范围内,扩展光源上的点光源成像具有平移不变性^[15].利用 (3) 式在像面上对扩展光源上点光源的成像进行卷积计算,得到扩展光源所成像的强度分布:

$$I_\lambda(x, y) = I_g * |U_\lambda(x, y)|^2 = \iint I_g(\tilde{x}, \tilde{y}) |U_\lambda(x - \tilde{x}, y - \tilde{y})|^2 d\tilde{x}d\tilde{y}, \quad (3)$$

式中 I_g 为与扩展光源强度分布对应的几何像相对强度分布, $|U_\lambda(x, y)|^2$ 为位于光轴上的点光源被 FZP 衍射成像的强度分布.计入入射光的光谱带宽,像面上强度分布用 (4) 式计算:

$$I = \int I_\lambda(x, y) d\lambda. \quad (4)$$

3 FZP 成像模拟结果

本文针对 X 射线 FZP 成像的模拟结果,在可见光波段进行模拟和原理性实验验证.为便于了解 X 射线 FZP 成像模拟结果,本节将之前 X 射线 FZP 成像模拟的主要参数和结果总结如下^[11,15,16]. X 射线 FZP 参数:工作波长为 0.275 nm,主焦距为 178 mm,总环(半波带)数为 100,最外环宽度为 0.35 μm .模拟方法参见文献^[15, 16]或本文可见光模拟部分.采用 10 倍放大成像,模拟给出了光源尺寸与入射光的光谱带宽对成像分辨能力的影响.定义光谱带宽 $w = \Delta\lambda/\lambda_0$,其中 λ_0 为中心波长 ($\lambda_0 = 0.275 \text{ nm}$), $\Delta\lambda$ 为波长范围.成像分辨能力的定义参见文献^[16]或下文第 4 节关于可见光的模

拟. 图 2 给出了光源尺寸、入射光光谱带宽对 FZP 成像的视场(物平面)中央分辨能力的影响. 从图 2 可见, 固定光源尺寸, 当入射光的光谱带宽增加时, 成像的分辨能力下降; 固定入射光光谱带宽, 当光源尺寸增加时, 分辨能力下降. 当入射光光谱带宽小于 3% 时, 即使光源尺寸达到 $700\ \mu\text{m} \times 700\ \mu\text{m}$, 成像分辨能力仍可高于 $1\ \mu\text{m}$. 因此, 采用这样的波带板能够实现亚微米空间分辨的成像.

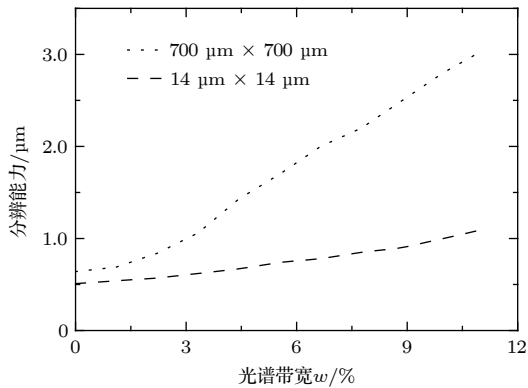


图 2 不同光源尺寸下 X 射线 FZP 成像的分辨能力随入射光光谱带宽的变化

Fig. 2. Spatial resolution of X-ray imaging by FZP versus incident light spectral bandwidth under different source sizes.

4 可见光数值模拟结果与讨论

4.1 光源尺寸对 FZP 成像的影响

对照第 3 节 X 射线 FZP 参数, 工作于可见光波段的 FZP 参数如下: 对应 $632.8\ \text{nm}$ 工作波长的主焦距为 $178\ \text{mm}$, 波带板为振幅(黑白)型, 总环数为 100, 最外环宽度为 $16.8\ \mu\text{m}$. 考虑到实验中像探测器接收面积和像素大小, 数值模拟选取 1 倍放大成像, 即物距与像距均为主焦距的 2 倍.

采用与 X 射线成像模拟同样的方法, 利用(2)—(4)式模拟了非相干扩展光源的成像. 扩展光源如图 3(a)所示, 是一个对比度为 1 的正方形网格状光源, 其中白色代表发光区, 黑色为不发光区. 发光区的点源复振幅设为相同. 这样的光源经过 FZP 成像后, 处理像中网格边缘的强度变化可得到像对比度和对物的空间分辨能力等结果. 该扩展光源的成像结果如图 3(b)所示, 可见像中央区域较亮, 边缘较暗. 这个现象是由 FZP 高级衍射效应形成的^[15]: 由于 FZP 存在高级衍射, 每个点光源经 FZP 成的像除了中心位于几何像点的艾里(Airy)斑外, 在像面上大尺度范围都有强度分布,

后者形成像的背景. 距离艾里斑越远, 背景强度越弱. 因此, 从点光源成像的强度分布和(3)式可知, 像中央的背景强度大于像边缘背景, 形成像中央区域较亮, 边缘较暗. 图 3(c)给出了光强沿水平方向 y_2 轴的分布情况. 参见图 3(b), y_2 轴位于像从上往下第六行方格中间位置. 为了得到视场中央的分辨能力与像对比度, 对图 3(c)中心的上升沿强度分布做数据处理, 如图 3(d)所示. 像对比度定义为

$$C = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}, \quad (5)$$

式中 I_{\max} 与 I_{\min} 分别为图 3(d) 网格边缘处强度调制的极大值与极小值. 分辨能力定义为 I_{\max} 与 I_{\min} 之间 20%—80% 光强变化对应的宽度 d . 由于采用 1:1 成像, d 也就是 FZP 成像对物的空间分辨能力.

为了考察扩展光源尺寸对成像的影响, 模拟了物形状和图 3(a) 网格源相同, 而物的边长分别为 1.2, 1.0, 0.5, 0.3, 0.1 cm 的正方形网格光源的成像. 对每个像处理其光强沿各自 y_2 轴的强度分布, 而每个像中 y_2 轴相对网格的位置与在图 3(b) 中设置相同, 得到视场中央分辨能力与像对比度. 它们随扩展光源尺寸变化情况如图 4 所示, 图中数据点之间连线是辅助可视性. 结果表明, 当光源尺寸从 0.1 cm 增加到 1.2 cm 时, 像对比度从 0.81 下降至 0.26, 下降明显. 与此不同的是, 相应分辨能力只是从 $22.0\ \mu\text{m}$ 缓慢下降至 $23.2\ \mu\text{m}$, 基本保持不变. 因此, 随着光源尺寸的增加, 视场中央分辨能力基本不变, 但像对比度的下降显著. 下降的原因正如我们之前研究已指出^[15]: FZP 高阶衍射导致像的背景互相叠加, 随着光源尺度增加致使对比度下降.

4.2 光谱带宽对 FZP 成像的影响

为了研究光谱带宽对 FZP 成像质量的影响, 使用尺寸为 $3\ \text{mm} \times 3\ \text{mm}$ 的网格扩展光源, 利用(4)式模拟了谱密度相同条件下, 入射光中心波长 $\lambda_0 = 632.8\ \text{nm}$, 光谱带宽 w 分别为 0.5%, 1.6%, 8%, 12% 时扩展光源的成像情况, 结果如图 5 所示. 可以观察到随着光谱带宽 w 的增加, 像变得越来越模糊. 这个现象参考第 2 节中 FZP 成像公式可以解释: 像距由物距和主焦距确定, 而 FZP 的主焦距与入射光波长有关. 当入射光波长偏离中心波长 λ_0 时, FZP 对该波长成的像会偏离 λ_0 的像面, 后者即像探测面的设定位置, 从而导致探测面上像模糊.

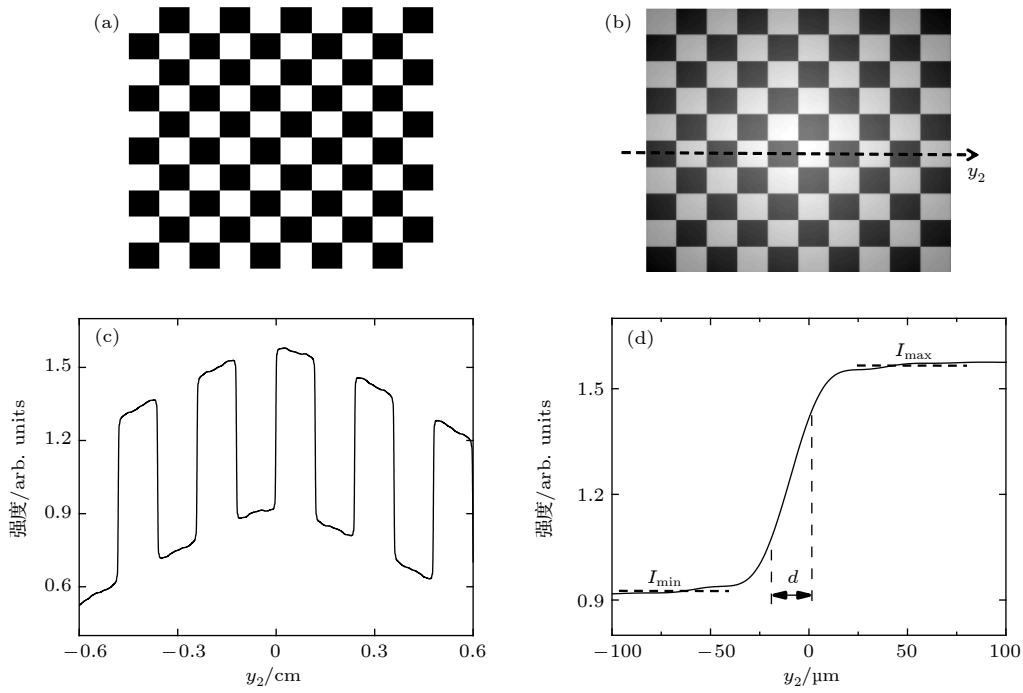


图 3 扩展光源模型及成像结果 (a) 扩展光源模型; (b) FZP 对扩展光源成的像; (c) 图 (b) 中像沿虚线 y_2 方向的强度分布; (d) 图 (c) 中 $y_2 = 0$ 附近的强度分布

Fig. 3. Extended source model and its imaging results: (a) Extended source model; (b) image of extended source by FZP; (c) intensity distribution along y_2 axis in panel (b); (d) intensity distribution near $y_2 = 0$ in panel (c).

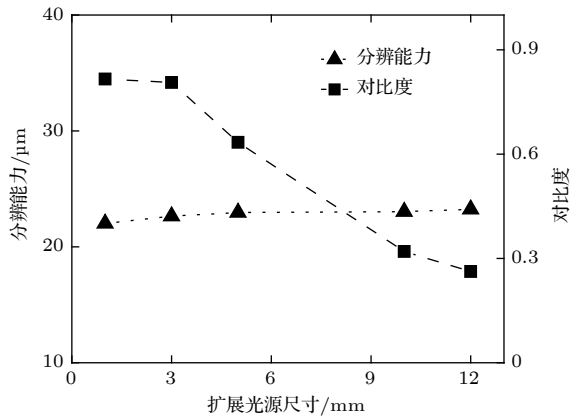


图 4 视场中央分辨能力与像对比度随扩展光源尺寸的变化

Fig. 4. Spatial resolution in the field-of-view center and image contrast versus the size of extended source.

采用与 4.1 节相同处理方法, 得到视场中央分辨能力与像对比度随光谱带宽的变化, 结果如图 6 所示, 图中数据点之间连线是辅助可视性. 可以看到, 当光谱带宽从 0 (单色) 增加至 12% 时, 分辨能力由 $23.3 \mu\text{m}$ 下降至 $80.0 \mu\text{m}$, 像对比度从 0.81 下降至 0.32. 因此, 随着光谱带宽的增加, 像对比度降低, 分辨能力也变差.

需要指出的是, 在同步辐射光源等 X 射线束线站上的 FZP 成像中, 为了追求衍射极限分辨能力, 要求入射光的光谱带宽小于 $1/N$, N 为 FZP 的总环数^[20](本文 $N = 100$). 而正如引言部分指出, 本文目的是研究 FZP 成像应用于激光等离子体诊断, 考察激光等离子体参数条件例如光源尺寸、光谱带宽对成像的影响. 因此, 模拟中考虑了光谱带宽超过 $1/N$ 的情况.

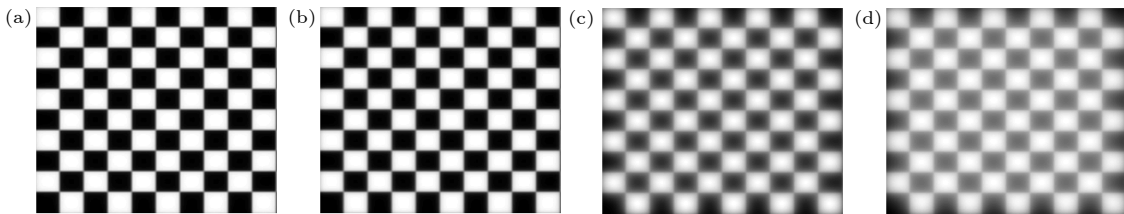


图 5 扩展光源在不同光谱带宽下的成像 (a) $w = 0.5\%$; (b) $w = 1.6\%$; (c) $w = 8\%$; (d) $w = 12\%$

Fig. 5. Images of an extended source with different spectral bandwidth: (a) $w = 0.5\%$; (b) $w = 1.6\%$; (c) $w = 8\%$; (d) $w = 12\%$.

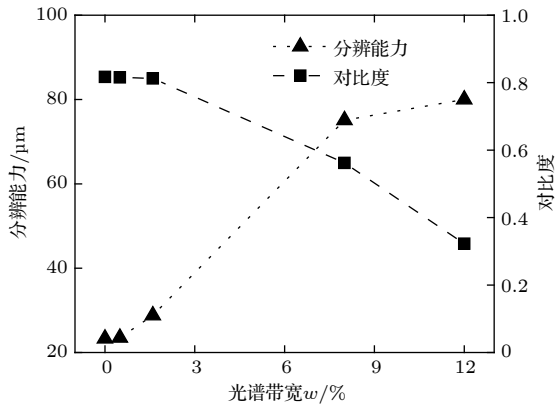


图 6 视场中央分辨能力与像对比度随光谱带宽的变化
Fig. 6. Spatial resolution in the field-of-view center and the image contrast versus spectral bandwidth.

5 实验与数值模拟结果的对比

5.1 光谱带宽对 FZP 成像的影响

实验安排如图 7 所示. 用一束近似平行的非相干白光照射 ZP_1 作为扩展光源. ZP_1 是采用微电子加工技术制作的带板图案, 由透光和不透光的环带组成. 和第 4 节数值模拟类似, 这样的扩展光源发光区与不发光区的对比度为 1. 紧贴 ZP_1 设置一个可变光阑, 改变光阑大小, 研究扩展光源尺寸对成像的影响. 波带板 FZP 对 ZP_1 成像, FZP 参数与第 4 节对可见光成像数值模拟使用的参数相同. ZP_1 与 FZP 中心共线. 以波长 632.8 nm 为基准确定像面位置, 成像的放大倍数约为 1. 像探测器是一台 CMOS 相机, 像素尺寸为 $5.2 \mu\text{m} \times 5.2 \mu\text{m}$. 相对于 632.8 nm 中心波长, 在像探测器前放置不同光谱带宽的滤波片, 使其接收到不同光谱带宽的像, 从而可研究入射光的光谱带宽对成像的影响.

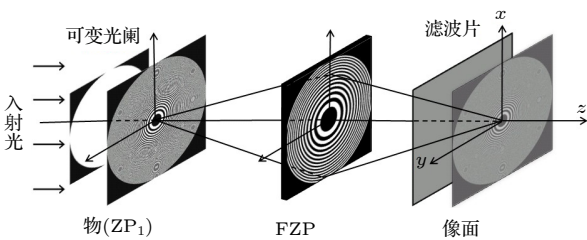


图 7 实验安排示意图
Fig. 7. Schematic diagram of experiment setup.

在考察扩展光源光谱带宽对成像的影响中, 固定可变光阑尺寸使扩展光源直径为 3 mm, 利用滤波片来选择入射光的光谱带宽. 图 8 的左列给出了光谱带宽参数 w 分别为 0.5%, 1.5%, 8%, 12% 时成像实验结果, 右列给出了相应像扣除像探测器背

景后经过其图案中心沿 x_2 方向 (参见图 8(a)) 的强度分布. 可见随着入射光的光谱带宽增加, 像变得越来越模糊, 对比度下降.

参考图 8(a) 右图的虚线所示, 按 4.1 节所述方法处理像图案的中心圆环区强度分布的上升沿, 可获得像对比度以及对应的视场中央分辨能力. 图 9 给出了像对比度与视场中央分辨能力随入射光光谱带宽的变化, 图中空心符号点及连线是图 6 的模拟结果. 结果表明, 随着扩展光源光谱带宽 w 从 0.5% 增加至 12%, 视场中央分辨能力从 $26.4 \mu\text{m}$ 下降至 $76.0 \mu\text{m}$, 像对比度从 0.74 下降至 0.41. 这一变化趋势与数值模拟结果相同 (参见图 9 中虚线). 定量比较, 实验与数值模拟结果也符合得较好. 例如, 当光谱带宽参数 $w = 8\%$ 时, 实验给出视场中央的分辨能力为 $70.0 \mu\text{m}$, 像对比度为 0.50, 而数值模拟给出视场中央的分辨能力为 $75.1 \mu\text{m}$, 像对比度为 0.56. 实验和数值模拟结果的相对偏差约 10%, 这可能来自实验数据的处理: 像探测器像素有一定大小以及接收的光强信号有涨落.

5.2 扩展光源尺寸对 FZP 成像的影响

实验中使用 $w = 0.5\%$ 的准单色光成像, 来验证扩展光源尺寸对成像影响的模拟结果. 4.2 节的数值模拟以及 5.1 节的实验结果表明, 对于当前所使用的 FZP, 入射光谱带宽分别为 0 和 0.5% 所成的像, 视场分辨能力与像对比度基本一样. 因此可以把 0.5% 的准单色光近似看成单色光. 控制可变光阑大小, 扩展光源的直径分别设为 3 和 12 mm, 记录成像结果. 采用与图 8 相同的数据处理方法, 得到像对比度与视场中央分辨能力随扩展光源尺寸的变化, 结果如图 10 所示, 图中空心符号点及连线是图 4 的数值模拟结果. 对于 3 和 12 mm 扩展光源, 像对比度分别为 0.74 和 0.30, 视场中央的分辨能力分别为 26.4 和 $28.7 \mu\text{m}$. 可见, 随着光源尺寸的增加, 视场中央分辨能力略微下降. 考虑到分辨能力的改变量 ($2.3 \mu\text{m}$) 小于像探测器的像素尺寸 ($5.2 \mu\text{m}$), 可以认为分辨能力基本不变. 与此不同的是, 像对比度显著降低. 这些变化趋势与图 4 的数值模拟结论一致. 图 4 的数值模拟结果给出了当扩展光源尺寸分别为 3 和 12 mm 时, 视场中央分辨能力分别为 22.6 和 $23.2 \mu\text{m}$, 像对比度分别为 0.80 和 0.26. 因此, 定量比较数值模拟与实验结果也符合得较好.

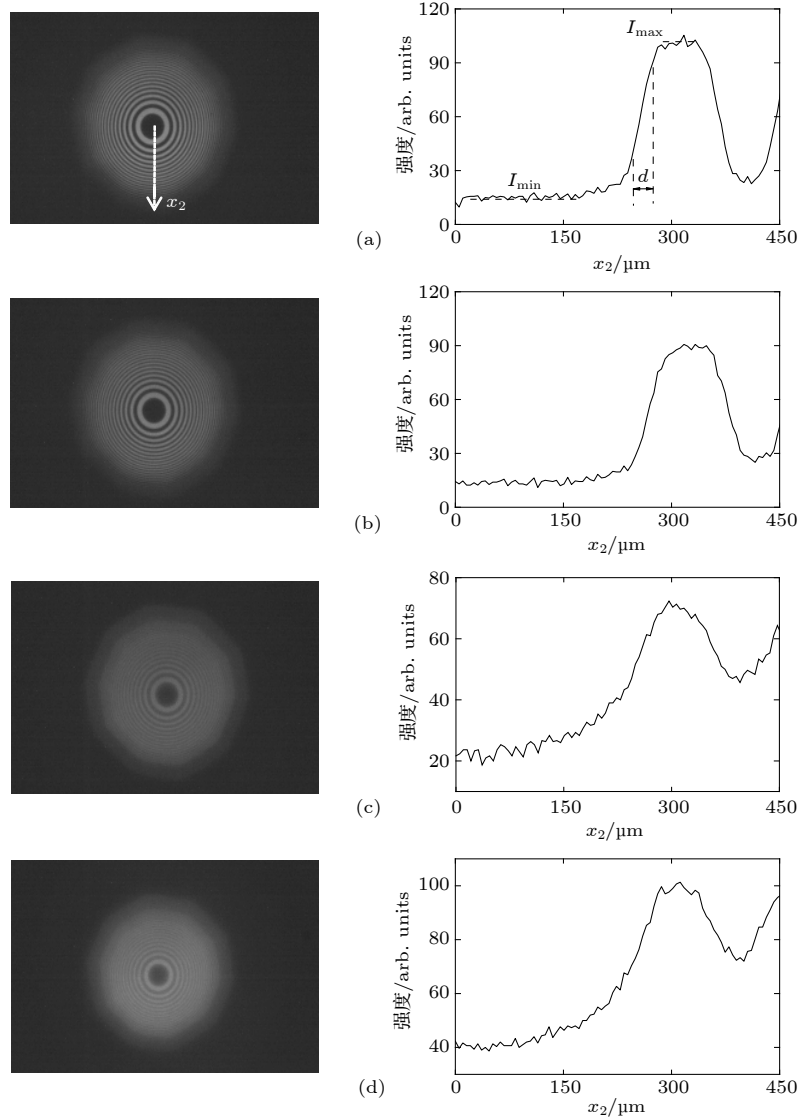


图 8 扩展光源直径为 3 mm 时不同光谱带宽的成像结果及其沿 x_2 轴方向强度分布 (a) $w = 0.5\%$; (b) $w = 1.5\%$; (c) $w = 8\%$; (d) $w = 12\%$

Fig. 8. Images of 3 mm-diameter source for different spectral bandwidth, and the corresponding intensity distribution along x_2 axis: (a) $w = 0.5\%$; (b) $w = 1.5\%$; (c) $w = 8\%$; (d) $w = 12\%$.

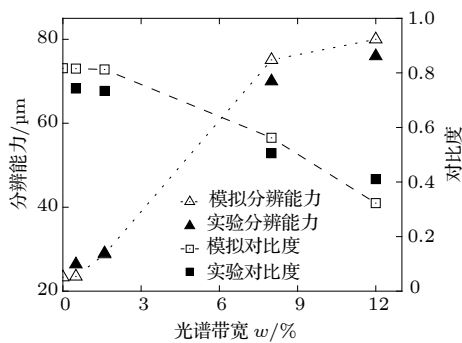


图 9 视场中央分辨能力与像对比度随光谱带宽变化的实验结果

Fig. 9. Experimental results for spatial resolution and image contrast in the field-of-view center versus spectral bandwidth.

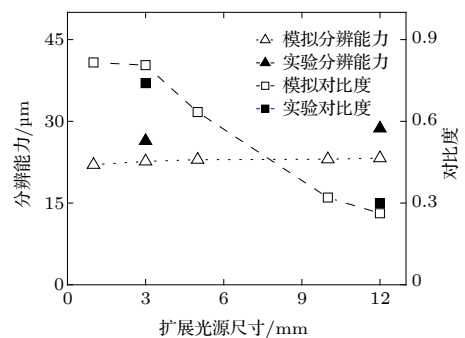


图 10 视场中央分辨能力与像对比度随扩展光源尺寸变化的实验结果

Fig. 10. Experimental results for spatial resolution and image contrast in the field-of-view center versus extended source size.

6 结 论

本文在可见光波段就扩展光源尺寸与入射光的光谱带宽对 FZP 成像的影响进行了数值模拟, 并进行了实验验证. 结果表明: 随着扩展光源尺寸的增加, 视场中央的分辨能力基本不变, 而像对比度降低. 当成像的入射光具有一定光谱带宽时, 随着光谱带宽的增加, 视场中央的分辨能力和像对比度同时降低. 实验结果不仅证实了数值模拟结果, 而且与模拟结果的定量比较也符合得较好. 本文模拟和实验所取得的结论与之前 X 射线 FZP 成像模拟的结果也一致, 不仅表明所采用的数值模拟方法可行, 也指出在 FZP 对扩展光源成像的应用中, 适当限制扩展光源尺寸, 特别是限制入射光的光谱带宽来实现高分辨能力和高对比度的成像是可行的.

陈晓虎、张巍巍在 X 射线成像的模拟, 袁亚运在光学实验和模拟的工作, 在此一并致谢.

参考文献

- [1] Lindl J D, Amendt P, Berger R L, Glendinning S G, Glenzer S H, Haan S W, Kauffman R L, Landen O L, Sute L J 2004 *Phys. Plasmas* **11** 339
- [2] Fujioka S, Shiraga H, Nishikino M, Shigemori K, Sunahara A, Nakai M, Azechi H, Nishihara K, Yamanaka K 2003 *Phys. Plasmas* **10** 4784
- [3] Xu P, Bai Y L, Liu B Y, Ouyang X, Wang B, Yang W Z, Gou Y S, Zhu B L, Qin J J 2012 *Appl. Opt.* **51** 7820
- [4] Hou L F, Wei M X, Yuan Y T, Yi T, Zhan X Y, Yi R Q, Yang G H, Liu S Y, Jiang S E 2013 *High Power Laser Part. Beams* **25** 2313 (in Chinese) [侯立飞, 韦敏习, 袁永腾, 易涛, 詹夏宇, 易荣清, 杨国洪, 刘慎业, 江少恩 2013 *强激光与粒子束* **25** 2313]
- [5] Marshall F J, Bennett G R 1999 *Rev. Sci. Instrum.* **70** 617
- [6] Aglitskiy Y, Lehecka T, Obenschain S, Bodner S, Pawley C, Gerber K, Sethian J, Brown C M, Seely J, Feldman U, Holland G 1998 *Appl. Opt.* **37** 5253
- [7] Koch J A, Aglitskiy Y, Brown C, Cowan T, Freeman R, Hatchett S, Holland G, Key M, MacKinnon A, Seely J, Snavely R, Stephens R 2003 *Rev. Sci. Instrum.* **74** 2130
- [8] Yi S Z, Mu B Z, Wang X, Jiang L, Zhu J T, Wang Z S, Fang Z H, Wang W, Fu S Z 2012 *High Power Laser Part. Beams* **24** 1076 (in Chinese) [伊圣振, 穆宝忠, 王新, 蒋励, 朱京涛, 王占山, 方智恒, 王伟, 傅思祖 2012 *强激光与粒子束* **24** 1076]
- [9] Chao W, Kim J, Rekawa S, Fischer P, Anderson E H 2009 *Opt. Express* **17** 17669
- [10] Young M 1972 *J. Opt. Soc. Am.* **62** 972
- [11] Wang X F, Wang J Y 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 025212 (in Chinese) [王晓方, 王晶宇 2011 *物理学报* **60** 025212]
- [12] Cauchon G, P-Thomasset M, Sauneuf R, Dhez P, Idir M, Ollivier M, Troussel P, Boutin J Y, Le Breton J P 1998 *Rev. Sci. Instrum.* **69** 3186
- [13] Azechi H, Tamari Y 2003 *J. Plasma Fusion Res.* **79** 398
- [14] Dong J J, Cao L F, Chen M, Xie C Q, Du H B 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 3044 (in Chinese) [董建军, 曹磊峰, 陈铭, 谢常青, 杜华冰 2008 *物理学报* **57** 3044]
- [15] Chen X H, Wang X F, Zhang W W, Wang W H 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 015208 (in Chinese) [陈晓虎, 王晓方, 张巍巍, 汪文慧 2013 *物理学报* **62** 015208]
- [16] Zhang W W, Wang X F 2014 *High Power Laser Part. Beams* **26** 022003 (in Chinese) [张巍巍, 王晓方 2014 *强激光与粒子束* **26** 022003]
- [17] Chen L M, Liu F, Wang W M, Kando M, Mao J Y, Zhang L, Ma J L, Li Y T, Bulanov S V, Tajima T, Kato Y, Sheng Z M, Wei Z Y, Zhang J 2010 *Phys. Rev. Lett.* **104** 215004
- [18] Powers N D, Ghebregziabher I, Golovin G, Liu C, Chen S, Banerjee S, Zhang J, Umstadter D P 2013 *Nat. Photon.* **8** 28
- [19] Yu D Y, Tan H Y 1999 *Engineering Optics* (Beijing: China Machine Press) pp249—250 (in Chinese) [郁道银, 谈恒英 1999 *工程光学* (北京: 机械工业出版社) 第249—250页]
- [20] Attwood D (translated by Zhang J) 2003 *Soft X-rays and Extreme Ultraviolet Radiation: Principles and Applications* (Beijing: Science Press) p354 (in Chinese) [阿特伍德 D 著(张杰 译) 2003 *软X射线与极紫外辐射的原理和应用* (北京: 科学出版社) 第354页]

Influence of source size and spectral bandwidth on the imaging of a zone plate

Lu Zhong-Wei Wang Xiao-Fang[†]

(*Department of Engineering and Applied Physics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China*)

(Received 26 June 2018; revised manuscript received 24 November 2018)

Abstract

Direct X-ray imaging by a Fresnel zone plate (FZP) has achieved a spatial resolution of 10 nm on a synchrotron beamline. It may be used to obtain submicron-resolution X-ray images of laser-plasma sources or fusion targets. However, none of previous imaging experiments with laser-plasma kilo-electron-volt X-ray sources shows such a high resolution. In comparison with the FZP imaging on a synchrotron, we consider a case of imaging an extended object with a laser-plasma X-ray source that the illumination monochromaticity is lower and the field of view larger. Our simulations show that the spatial resolution is affected by both the object size and the spectral bandwidth of the source, which can explain the previous experiments. We conclude that by using a 100-zone FZP to image an object with up to 700 μm in size, a spatial resolution better than 1 μm can be realized by using X-rays of several kilo-electron volts and a spectral bandwidth just less than 3%. In this paper, we report a proof-of-principle study in simulation and experiment in an optical range centered at 632.8 nm. The simulation is performed with the same method as that previously used for X-ray imaging but with a 100-zone FZP working in the optical range. Simulations show that with the increase of the object size, the field-of-view contrast is degraded, but the spatial resolution is nearly unchanged. With the increase of the spectral bandwidth for the illumination, both the contrast and the resolution are degraded. In the experiments, different spectral bandwidths are realized by band-pass filters and different object sizes by an adjustable aperture. The experimental results are confirmed to be in agreement with the simulations. These results reveal that given a satisfied spectral bandwidth of laser-plasma X rays, the FZP imaging will be a promising approach to 1 μm or higher resolution X-ray imaging of a 1-mm-size object.

Keywords: imaging of zone plate, extended source, laser plasma

PACS: 52.70.-m, 42.79.Ci, 52.57.-z

DOI: 10.7498/aps.68.20181236

[†] Corresponding author. E-mail: wang1@ustc.edu.cn