

相位型波带板应用于大尺度 X 射线源 成像的分析与模拟*

陈晓虎 王晓方[†] 张巍巍 汪文慧

(中国科学技术大学近代物理系, 合肥 230026)

(2012 年 6 月 1 日收到; 2012 年 7 月 30 日收到修改稿)

针对大尺度物体的 keV-X 射线高分辨成像, 分析了相位型菲涅耳波带板 (FPZP) 对物平面 1 mm 区域内点源的成像, 确定像的空间分布具有不变性, 提出了一种 FPZP 对扩展光源成像的计算方法. 使用这一方法, 模拟了放大倍数为 10 的典型实验条件下最外环宽 $0.35\ \mu\text{m}$ 的 FPZP 对扩展单色光源的成像. 结果表明, 随着扩展光源尺度的增加, 像的对比度降低. FPZP 的负 1 级和 0 级衍射是导致像的背景增强和对比度降低的主要因素, 并相应导致成像对物方的空间分辨能力下降. 对于强度空间分布为正弦调制、对比度为 1 的 1 mm 尺度方形光源, 像的对比度低于 0.4, 物方分辨能力为 $0.75\ \mu\text{m}$.

关键词: X 射线成像, 扩展光源, 菲涅耳波带板, 高级衍射

PACS: 52.70.La, 52.70.-m, 52.57.-z, 42.79.Ci **DOI:** 10.7498/aps.62.015208

1 引言

激光惯性约束聚变 (ICF) 对靶丸压缩的对称性提出极高的要求^[1]. 为了研究压缩过程中的流体力学过程, 实验上常用 keV 能量的 X 射线透视靶丸, 对靶进行高分辨 keV-X 射线成像. 基于靶丸 1 mm 几何尺度以及高密度压缩时 1—2 μm 的密度梯度长度与流体力学不稳定性初始扰动波长^[2], 对 X 射线成像提出要求: 视场 1 mm, 空间分辨能力 1—2 μm . 目前常用的成像方案有: 针孔成像^[3]、反射镜成像^[4]. 针孔成像的视场很大, 但最好的分辨能力为 5—10 μm , 并且收集立体角较小^[3]. 反射成像属于掠入射成像, 分辨能力为 2—3 μm , 但视场一般为几百微米^[4].

一种有望应用于大视场高分辨成像的诊断是 X 射线菲涅耳波带板 (FZP) 成像^[5]: 一方面 FZP 在 X 射线显微术中最高分辨能力已达到近 10 nm^[6,7], 另一方面 FZP 采用正入射方式能实现大视场成像^[5]. 由于半波带材料对 X 射线部分

透射, 引入附加相移, 故这样的 FZP 也称为相位型波带板 (FPZP). 法国 CEA 使用激光等离子体 X 射线源, 利用 FPZP 成像在 300 μm —1 mm 物方大视场范围获得 4—5 μm 的分辨^[8]. 后来, 日本大阪大学激光工程研究所通过限制光源尺度获得了 2 μm 的分辨^[9]. 中国工程物理研究院激光聚变研究中心在 FPZP 成像实验中, 验证了 FPZP 聚焦 X 射线的的能力, 但是尚无分辨能力检测等结果^[10]. 作者曾就 FPZP 对点光源的成像进行了系统分析^[5]. 与上述实验报道比较, 作者认为实验中分辨能力降低的一个可能原因是: 等离子 X 射线源或成像物体具有一定大小, 在 FPZP 成像时, FPZP 的高级衍射会形成像的背景, 降低成像质量, 从而可能降低分辨能力. 然而, 存在高级衍射情况下 FPZP 对 ICF 靶等具有一定几何尺度扩展光源的成像, 还未见系统的理论研究.

本文针对 1 mm 尺度非相干扩展光源, 在 10 倍放大成像的典型条件下, 分析了 FPZP 对物平面 1 mm 区域内点光源的成像, 确定像的空间分布

* 国家重大专项计划和中国科学院基金 (批准号: KJCX2-YW-N36) 资助的课题.

[†] 通讯作者. E-mail: wangl@ustc.edu.cn

具有不变性. 基于此, 提出了一种 FPZP 对扩展光源成像的计算方法, 即通过对点光源像强度分布的卷积计算得到扩展光源的像强度分布. 使用这一方法, 数值模拟了 FPZP 对扩展单色光源的成像, 研究了扩展光源尺度、FPZP 高级衍射对像的对比度和对物方空间分辨能力的影响, 将取得结果与国内外已有实验报道进行了比较.

2 FPZP 成像分析方法

2.1 FPZP 成像原理

FPZP 成像的原理如图 1 所示. 参考相关文献 [5], 假设物面为发射 0.275 nm 波长的非相干扩展源, 经过 FPZP 衍射直接成像. 选取的 FPZP 参数如下: 材料为金, 总环数 100, 主焦距 177.8 mm, 最

外环半径 70 μm , 最外环宽度 0.35 μm , 厚度 $d = 900$ nm. 选取这一厚度是考虑材料金产生的相移使 FPZP 的 1 级衍射效率接近最高, 为 22.7%^[11]. 本文的分析与模拟都选取 10 倍放大成像的典型实验条件, 此时物距 $p = 195.58$ mm, 像距 $q = 1955.8$ mm. 在此情况下, 1 mm 的扩展源 (-500 — 500 μm) 经过 FPZP 成像, 其几何像范围在 -5000 — 5000 μm .

假设扩展源为非相干单色光源. 扩展源上的任一点源 a 经过 FPZP 的衍射成像后, 在像面的复振幅空间分布由基尔霍夫积分公式^[12]给出:

$$U(x, y) = -\frac{iA(x_0, y_0)}{2\lambda} \iint_{\Sigma} \frac{\tilde{t}(\rho, \theta) e^{ik(r+s)}}{rs} \times [\cos(\hat{n}, \hat{r}) + \cos(\hat{n}, \hat{s})] \rho d\rho d\theta,$$

$$r = \sqrt{(x_0 - \rho \cos \theta)^2 + (y_0 - \rho \sin \theta)^2 + p^2},$$

$$s = \sqrt{(x - \rho \cos \theta)^2 + (y - \rho \sin \theta)^2 + q^2},$$

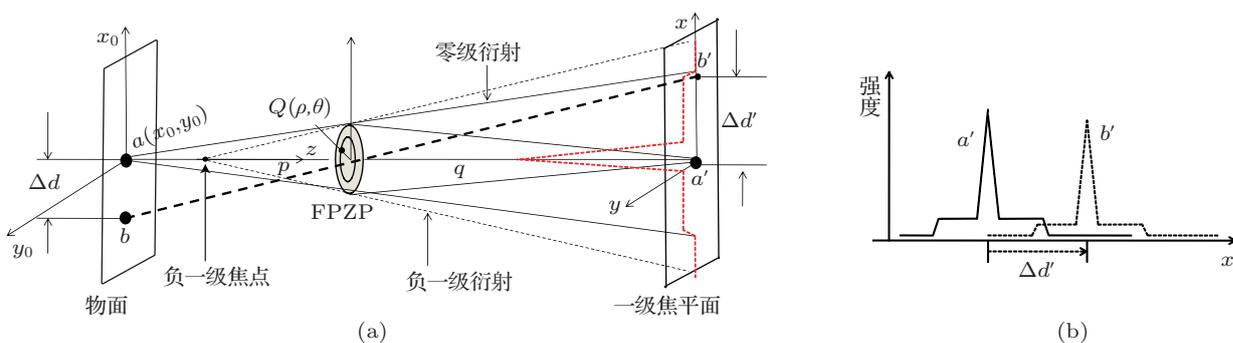


图 1 FPZP 成像示意图 (a) 成像及坐标系, z 轴为光轴, 垂直 FPZP 并经其中心; (b) 两点源成像的强度非相干叠加示意图

其中, $A(x_0, y_0)$ 为点源复振幅, λ, k 分别为点源单色 X 射线的波长和波矢数, ρ, θ 为 FPZP 表面 Q 点的极坐标, \tilde{t} 为 FPZP 的透过率函数, r, s 分别为物点 a 到 FPZP 表面某点 $Q(\rho, \theta)$ 和 Q 到考察点 a' 的距离, p, q 分别为物距和像距, $(\hat{n}, \hat{r}), (\hat{n}, \hat{s})$ 分别对应 FPZP 法向与物方波矢、像方波矢的夹角. 实际应用中, 光源和探测面都近光轴, 因此倾斜因子

$$\cos(\hat{n}, \hat{r}) + \cos(\hat{n}, \hat{s}) \approx 2, \quad \frac{1}{rs} \approx \frac{1}{pq}.$$

省略常量后, 点光源 a 成像在像面的强度分布可简化为

$$I(x, y) = |U(x, y)|^2 = |A(x_0, y_0)|^2 \left| \iint \tilde{t}(\rho, \theta) \exp(ikr) \times \exp(iks) \rho d\rho d\theta \right|^2. \quad (1)$$

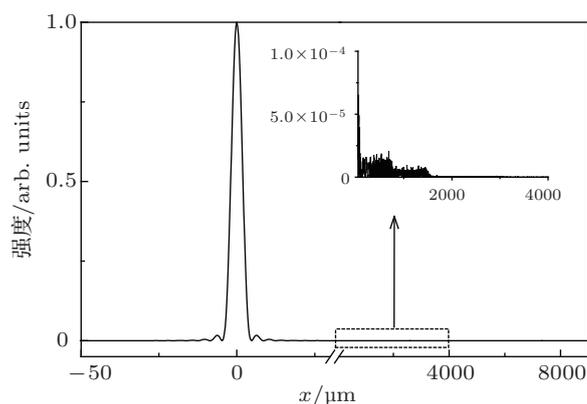


图 2 轴上点光源成像沿 x 方向的强度分布, 内插图显示其高级衍射特征

图 2 是根据 (1) 式数值计算得到的光轴上点光源成像在像面沿 x 方向的强度分布. 几何像点 ($x = 0$) 及其附近对应点光源像的艾里斑或一级像, 携带了成像诊断所需信息. 从图中可见, 距离几何

像点很远的地方依然有一定的强度分布, 来自其他级次衍射, 它们形成像的背景. 取 50—4000 μm 的细节得到图 2 中的内插图, 可见图中的强度分布成台阶状, < 750 μm 区域强度分布在 10^{-5} 数量级, 750—1500 μm 的强度分布在 10^{-6} 数量级, > 1500 μm 区域的强度分布在 10^{-7} 数量级. 对照图 1 中所示的各级衍射光在 1 级焦平面的范围, < 750 μm 的台阶分布主要来自 0 级衍射, 750—1500 μm 主要是负 1 级衍射和 3 级衍射 (前者较后者高近一个数量级), > 1500 μm 主要是其他负级次, 5 级和更高级的衍射. 由此可见, 不同衍射级次的分布范围不同. 因此, 对于扩展光源的成像, 每个几何像点会接收到来自物方其他区域的各级衍射的贡献, 并且与扩展源的尺度有关.

2.2 点源成像不变性和扩展光源成像计算方法

文献 [5] 给出, FPZP 对一定离轴范围内的点源成像具有不变性, 即点光源 1 级衍射艾里斑形状不变. 为了研究对扩展光源的成像, 还需要考察远离艾里斑中心 (几何像点) 区域的像强度分布是否满足不变性.

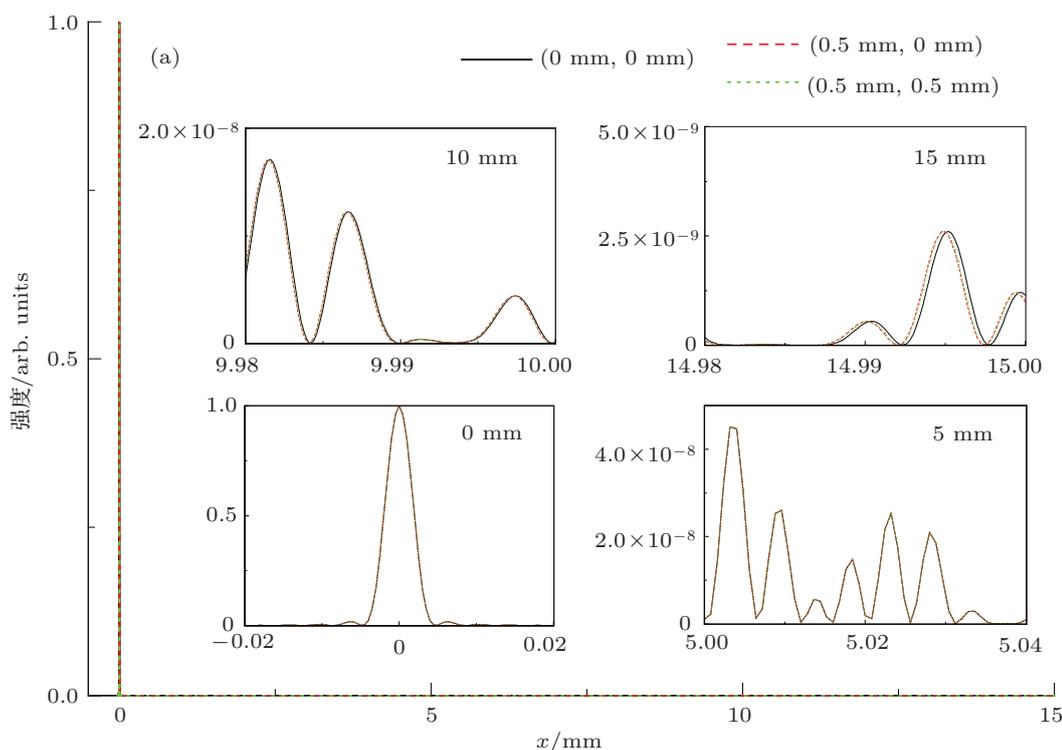
利用 (1) 式模拟了点光源位于物面三个典型位置 (x_0, y_0) 的成像, 它们分别位于轴上 (0 mm,

0 mm), 离轴 (0.5 mm, 0 mm), 离轴 (0.5 mm, 0.5 mm). 图 3(a) 和 (b) 给出这三个点源对应的像分别沿 x, y 方向的强度分布. 为了方便比较, 已将不同像的几何像点平移到位置 0, 图中横坐标为距离几何像点的位置. 内插图显示的是在 0, 5, 10, 15 mm 等处的细节. 从中可以看到, 只在距离几何像点很远的区域, 强度分布才有微小偏差. 定义强度分布的相对偏差为 $\delta = \frac{\Delta I}{I}$, I 为某一位置的强度值, ΔI 为任意两个点源的像强度之差, 可以计算出距离几何像点 5 mm 以内, 相对偏差 δ 为 0, 即此区域成像完全相同. 在距离几何像点 10 mm 处相对偏差仅为 0.6%. 在距离几何像点 15 mm 处相对偏差 δ 也仅为 5%, 而且由于此区光强 I 本身已很小, 对像的贡献相对也小些. 因此, 可以认为, 对应 1 mm 扩展光源的几何像范围 -15—15 mm (注: 计入像面对角线范围) 点源成像的强度分布具有不变性.

在点源成像不变性的情况下, 利用下式在像面对点光源的成像进行卷积计算, 就可得到扩展光源所成像的强度分布:

$$I_c(x, y) = I_g * I = \iint I_g(\tilde{x}, \tilde{y}) I(x - \tilde{x}, y - \tilde{y}) d\tilde{x} d\tilde{y}, \quad (2)$$

其中 I_g 为与扩展光源强度分布对应的几何像强度分布, I 为按照 (1) 式获得的轴上点光源成像的强度分布, $(x - \tilde{x}, y - \tilde{y})$ 表示相对几何像点 (\tilde{x}, \tilde{y}) 的坐标.



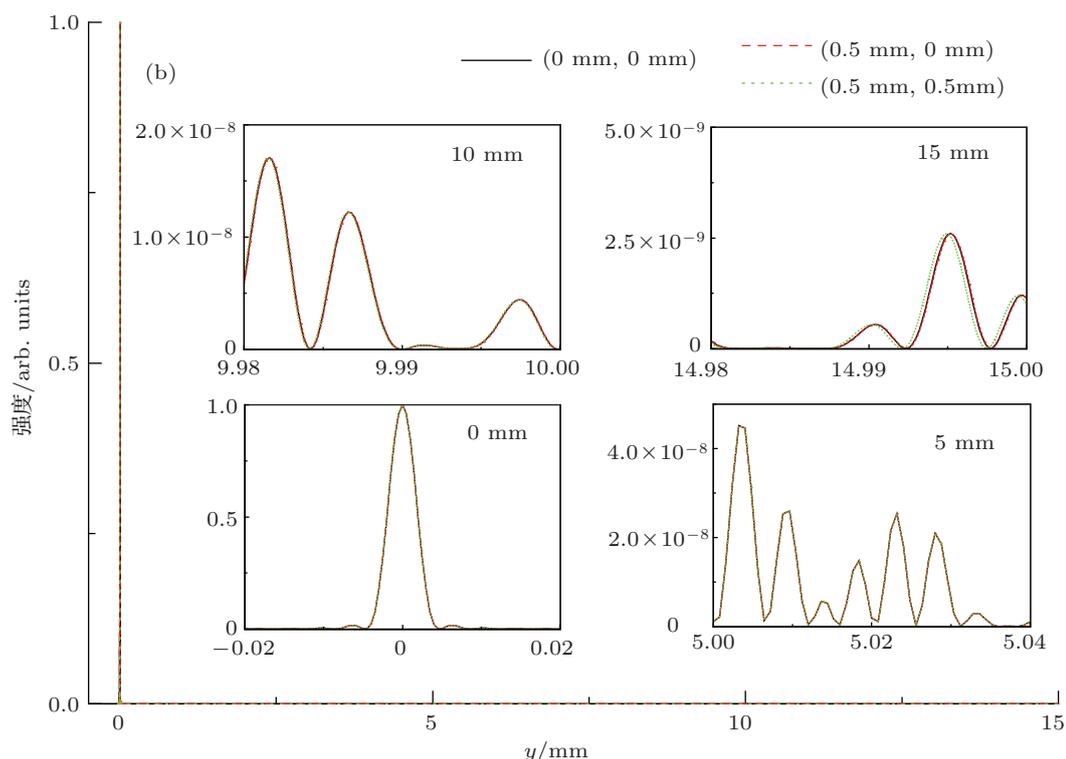


图3 物面不同位置点光源成像的强度分布 (a) x 方向强度分布比较; (b) y 方向强度分布比较

3 模拟结果和讨论

3.1 扩展光源尺度对像对比度的影响

通过 (2) 式, 模拟了扩展光源的成像. 扩展光源如图 4 所示, 是沿 x_0 方向强度分布为正弦调制、对比度为 1 的方形光源. 通过改变扩展源强度调制周

期 (0.5—5 μm), 比较像的对比度来考察扩展光源对成像对比度的影响.

源或像的对比度定义如下:

$$C = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}},$$

I_{\max} , I_{\min} 分别为物面或像面一个调制周期中强度的极大和极小值.

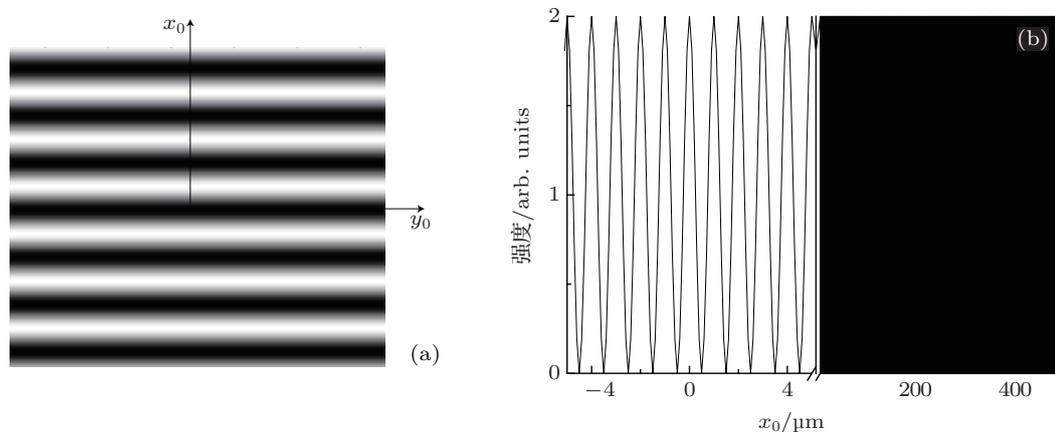


图4 扩展光源示意图及强度分布 (a) 光源二维分布, 横向为 y_0 方向, 纵向为 x_0 方向, 光轴经过光源中心; (b) 光源沿 x_0 方向强度分布

图 5 给出调制周期为 $0.75 \mu\text{m}$, 对比度为 1 的 $1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ 方形扩展光源经 FPZP 成像沿像面 x 方向的强度分布. 从中得到视场中心 (即像中心区域, 对应物方中心区域) 对比度为 0.15, 与光源的对比度相比明显降低.

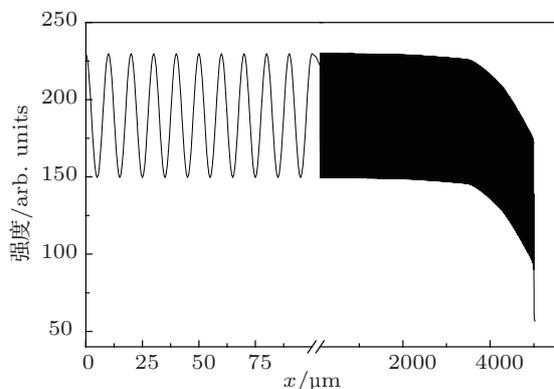


图 5 调制周期为 $0.75 \mu\text{m}$, 对比度为 1 的 1 mm 方形扩展光源成像沿 x 方向的强度分布

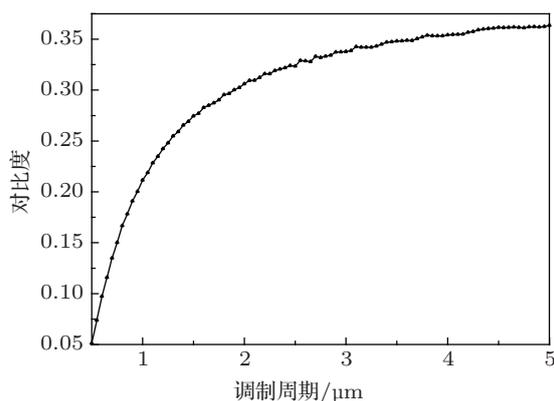


图 6 像对比度随 1 mm 方形扩展光源调制周期的变化

改变光源调制周期, 分别计算所成的像, 图 6 给出视场中心对比度随光源调制周期的变化曲线. 从结果可见, 随着源调制周期从 $5 \mu\text{m}$ 变小到 $0.5 \mu\text{m}$, 像对比度从 0.36 下降到 0.05. 特别是当源调制周期小于 $1.8 \mu\text{m}$ 时, 对比度快速下降. 而在源调制周期大于 $2.5 \mu\text{m}$ 时, 像的对比度差别不大.

其次, 考察扩展光源大小对成像对比度的影响. 图 7 给出光源调制周期为 $1 \mu\text{m}$ 的条件下, 视场中心区域对比度随扩展源尺度变化的曲线. 从结果可见, 随着源尺度增加, 像的对比度降低. 其中, 扩展源尺度 $300 \mu\text{m}$ 是影响像对比度下降快慢的一个临界尺度. 在扩展源小于 $300 \mu\text{m}$ 时, 对比度随光源尺度增加下降很快. 在此范围, 随着扩展源增大, 像面中心接收的零级与负 1 级贡献增加, 导致背景增

大, 对比度降低. 而当扩展源大于 $300 \mu\text{m}$ 时, 对比度随扩展源变大只是缓慢下降. 这是因为: 在物面 $-75 \sim 75 \mu\text{m}$ 范围, 以及 $-150 \sim 150 \mu\text{m}$ 范围的物点分别通过 0 级衍射和负 1 级衍射对像面中心有贡献. 当光源尺度进一步增大时, 像面中心接收到的 0 级衍射和负 1 级衍射贡献达到饱和. 而更高级衍射因其所占能量相对小些并且分布范围更大, 对像背景的贡献只是造成像对比度缓慢下降.

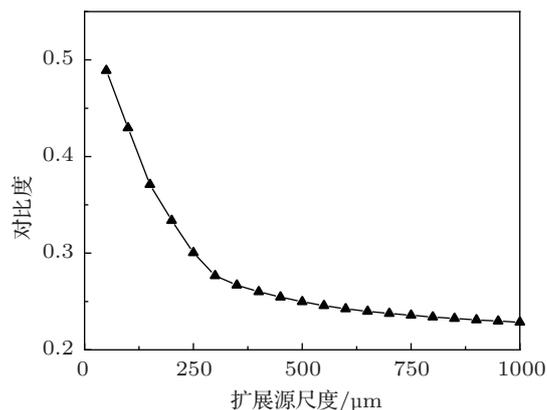


图 7 $1 \mu\text{m}$ 调制周期下, 像对比度随扩展光源尺度的变化

3.2 扩展光源尺度对空间分辨能力的影响

FPZP 成像的空间分辨极限通常由瑞利判据给出, 在 10 倍放大成像情况下通过点光源成像给出分辨极限为 $0.47 \mu\text{m}$ ^[5]. 而对于扩展光源的成像, 由于高级衍射导致像的背景增强, 反衬度降低, 影响成像的分辨能力. 为此, 可采用对比度传递函数给出空间分辨能力. 参照瑞利判据^[13]: 物面两点光源刚可分辨时, 两艾里斑中心连线的中心的光强是艾里斑中心光强的 73.5%, 对应的像对比度为 0.15. 对于不同尺度的方形扩展光源, 类似第 3.1 节保持光源强度调制对比度为 1, 而改变光源的调制周期, 确定出所成像的对比度为 0.15 时对应的源调制周期, 即为 FPZP 对该尺度光源成像的空间分辨能力.

图 8 给出 10 倍放大成像情况下, 空间分辨能力随扩展光源大小的变化. 当光源尺度为 $50 \mu\text{m}$ 时, 空间分辨能力为 $0.57 \mu\text{m}$. 当光源尺度增加到 $300 \mu\text{m}$ 时, 分辨能力下降到 $0.71 \mu\text{m}$ 之后, 随着光源尺度进一步增加, 直到 $1000 \mu\text{m}$, 分辨能力缓慢下降到 $0.75 \mu\text{m}$. 正如第 3.1 节分析所指出: 随着光源尺度增大, 0 级、负 1 级衍射对视场中心像的背景不断增加. 当扩展源尺度超过 $300 \mu\text{m}$ 时, 像面中心接收到的 0 级衍射和负 1 级衍射贡献达到饱和,

而更高级次的衍射对像面中心的贡献仅随光源尺度增加而缓慢增加, 导致分辨能力缓慢降低. 因此, 导致分辨能力下降的主要因素是 FPZP 的 0 级和负 1 级衍射.

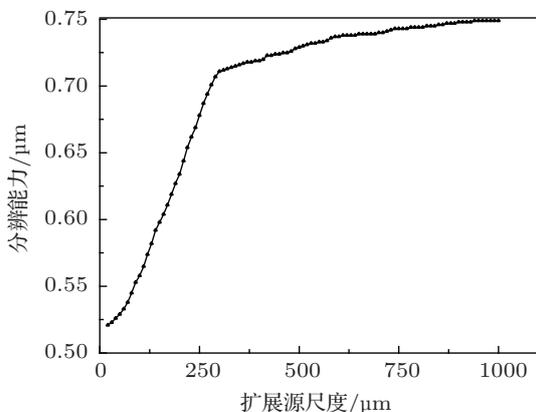


图 8 分辨能力随扩展光源尺度的变化

以上针对源强度调制对比度为 1 的情况进行了模拟和分析. 从前面图 6, 7 结果知道, 像的对比度相对于源降低, 特别是在光源尺度较大情况下更明显. 如果光源的对比度变差 (< 1), 像的对比度会相应下降, 造成实际可分辨能力下降. 因此, 在 FPZP 成像应用中, 可通过限制源的尺度来保证 FPZP 成像的高空间分辨能力.

3.3 与文献报道结果的比较和讨论

在扩展光源尺度影响 FPZP 成像分辨能力的实验中, Cauchon 等^[8]对 ~ 1 mm 尺度光源成像, 获得了 $5 \mu\text{m}$ 的空间分辨能力; 对 $300 \mu\text{m}$ 尺度光源成像, 获得了 $4 \mu\text{m}$ 的空间分辨能力. Azechi 等^[9,14]对 $70 \mu\text{m}$ 尺度光源成像, 获得了 $2.2 \mu\text{m}$ 的空间分辨能力. DaSilva 等^[15]在 X 射线显微术实验中, 对小于 $25 \mu\text{m}$ 的光源成像, 获得了 ~ 100 nm 的空间分辨能力. 虽然上述几个实验结果是在不同的光源和 FPZP 参数条件下取得的, 但从中归纳可以得到, 随着光源的几何尺度增加, FPZP 成像的空间分辨能力下降. 这一结论与本文模拟得到的规律 (参见图 8) 一致. 而通过本文的分析与模拟从物理上明确了在上述实验中光源尺度增加导致分辨能力下降的

主要原因是, FPZP 的 0 级和负 1 级衍射导致成像的对比度下降, 造成分辨能力相应下降.

更细致的比较发现, 在光源尺度很小或接近点光源情况时, 例如文献 [15] 的实验, 分辨能力由 FPZP 的最外环宽度决定, 这与已有成像理论^[5,13]以及本文的模拟一致, 即在单色光并接近点光源条件下成像可获得最高分辨能力. 当光源几何尺度增加时, 文献 [8, 9, 14] 报道的分辨能力较本文模拟结果更低些. 这是因为在这些文献 [8, 9, 14] 中入射光是非单色的. 由文献 [5] 可知, 当入射光的单色性变差时, 会进一步导致 FPZP 成像的对比度下降, 从而进一步降低空间分辨能力. 因此, 在光源或 FPZP 成像的入射光单色性得以保证的前提下, 实现满足空间分辨需求的 FPZP 成像的有效途径是适当限制扩展光源或成像物体的几何尺度. 本文的分析与模拟结果表明, 在这样的条件下, 对于 1 mm 尺度扩展光源, FPZP 成像的分辨能力可达 $0.75 \mu\text{m}$.

4 结论

本文分析了 FPZP 对 0.275 nm 扩展 X 射线源成像, 光源大小对成像的对比度和分辨能力的影响. 基于点光源成像不变性, 提出了一种 FPZP 对扩展源成像的计算方法. 通过对扩展源 10 倍放大成像的模拟, 结果表明: 以负 1 级和 0 级衍射为主的高级衍射形成像的背景, 造成像的对比度降低, 也造成 FPZP 成像的空间分辨能力降低. 例如对强度为正弦分布、调制对比度为 1 的 1 mm 尺度扩展光源, 像的对比度被限制在 0.4 以下. 当扩展源尺度增大到 $300 \mu\text{m}$ 时, 分辨能力从点源时的 $0.47 \mu\text{m}$ 下降到 $0.71 \mu\text{m}$. 对于 1 mm 扩展光源, 分辨能力为 $0.75 \mu\text{m}$. 这些因素在 FPZP 对扩展 X 射线源的成像应用中应加以考虑. 本文结果也表明, 采用本文给定参数或者采用最外环宽度更窄的 FPZP, 适当限制源的尺度, 获得高空间分辨成像是可行的.

工作中与魏来、王晶宇、吴朝进行了讨论, 在此一并致谢.

- [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] Xiang Z L, Yu C X 1982 *High Temperature Plasma Diagnostics* (vol.2) (Shanghai: Shanghai Science and Technology Press) pp206–207 (in Chinese) [项志遯, 俞昌旋 1982 高温等离子体诊断技术 (下册) (上海: 上海科学技术出版社) 第 206—207 页]
- [4] Marshall F J, Bennett G R 1999 *Rev. Sci. Instrum.* **70** 617
- [5] 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]
- [6] Chao W, Harteneck B D, Liddle J A, Anderson E H, Attwood D T 2005 *Nature* **435** 1210
- [7] Tian Y C, Li W, Chen J, Liu L, Liu G, Tkachuk A, Tian J, Xiong Y, Gelb J, Hsu G, Yun W 2008 *Rev. Sci. Instrum.* **79** 103708
- [8] 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
- [9] Azechi H, Tamari Y 2003 *J. Plasma Fusion Res.* **79** 398
- [10] 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]
- [11] Kirz J 1974 *J. Opt. Soc. Am.* **64** 301
- [12] Born M, Wolf E 2001 *Principles of Optics* (7th Ed.) (Cambridge: Cambridge University Press) pp421–491
- [13] Attwood D (Translated by Zhang J) 2003 *Soft X-rays and Extreme Ultraviolet Radiation: Principles and Applications* (Beijing: Science Press) pp349–359 (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 349—359 页]
- [14] Azechi H, Tamari Y, Shiraga H 2003 *Institute of Laser Engineering Annual Reports* (Osaka: Osaka University) p100
- [15] Da Silva L B, Trebes J E, Mrowka S, Barbee T W, Brase J J, Koch J A, London R A, MacGowan B J, Matthews D L, Minyard D, Stone G, Yorkey T, Anderson E, Attwood D T, Kern D 1992 *Opt. Lett.* **17** 754

Analysis of imaging an extended X-ray source by using a Fresnel phase zone plate*

Chen Xiao-Hu Wang Xiao-Fang[†] Zhang Wei-Wei Wang Wen-Hui

(Department of Modern Physics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

(Received 1 June 2012; revised manuscript received 30 July 2012)

Abstract

To image a large-size object with a high spatial resolution in a kiloelectronvolt (keV) X-ray range, a method is proposed to analyze and simulate the imaging of an extended X-ray source by a Fresnel phase zone plate (FPZP), based on the translational invariance of the point spread function in a 1 mm square area on the objective plane. Using this method, the imaging of an extended source of a different size is simulated under a typical experimental condition of image-to-source magnification of 10 for an FPZP of an outmost zone width of 0.35 μm . The results show that the image contrast decreases with the increase of the source size, and the zeroth-order and the minus first-order diffractions of the FPZP contribute mainly to the image background enhancement and the contrast decrease. The spatial resolution to the objective plane is also found to be reduced. For a 1-mm-square-shape source with a sinusoidal-distribution intensity modulation of contrast 1, the image modulation contrast is below 0.4, and the spatial resolution is 0.75 μm .

Keywords: X-ray imaging, extended source, Fresnel zone plate, high order diffraction

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

DOI: 10.7498/aps.62.015208

* Project supported by the China National Science and Technology Major Project and the Project of Chinese Academy of Sciences, China (Grant No. KJCX2-YW-N36).

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