

针孔阵列扫描成像系统研究

江少恩 郑志坚 刘忠礼 缪文勇 陈正林 胡 昕
(中国工程物理研究院核物理与化学研究所, 四川 621900)

摘 要 采用多针孔线阵配 X 光条纹相机, 由多个针孔的一维条纹图像的数据, 利用图像处理技术重建出二维图像。由此获得一项高时间分辨的二维空间成像技术(MIXS), 此技术利用现有的设备获得比 X 光分幅相机高得多的时间分辨的二维图像。

关键词 针孔阵列, X 光条纹相机, 图像处理。

在惯性约束聚变中, 内爆压缩过程通常采用时间分辨的 X 光成像技术进行诊断。在内爆压缩早期的加速阶段, 时间尺度为几百皮秒(ps), 对此进行诊断所需的时间分辨应小于 50 ps 量级。X 光分幅相机能满足此要求^[1]。但是, 在接近最大压缩时, 内爆芯部等离子体减速和停滞阶段的时间仅为 100 ps 左右, 对此诊断的测量仪器要求具有 10 ps 的时间分辨。但国际上现阶段最快的 X 光分幅相机的时间分辨为 35 ps, 我国现有的最快的 X 光分幅相机时间分辨为 60 ps, 显然, 现阶段的 X 光分幅相机不能满足时间分辨为 10 ps 的要求。为了解决这个问题, 考虑采用多针孔配 X 光条纹相机技术^[2-4]。多针孔配 X 光条纹相机技术可以起到 5 ps 时间分辨的分幅相机的作用。

条纹相机具有时间分辨和一维空间分辨的扫描特性, 其中一维是将条纹相机狭缝对准靶的一条窄带, 然后对此带进行时间扫描。多针孔配 X 光条纹相机技术利用条纹相机此特性, 配合多针孔线阵, 此线阵与条纹相机的狭缝成一狭角, 于是靶的多个针孔像成像于狭缝, 针孔和狭缝的配合便可选取不同位置的窄带, 通过图像处理技术即可重建出 X 光二维图像。利用条纹相机时间分辨的特性, 可以测得很高时间分辨(5 ps)的分幅图像。 N 个分开相同距离的针孔线阵放置于 X 光条纹相机的阴极狭缝前, 针孔线阵与狭缝成一倾斜角 θ 。于是两个相邻位置的图像垂直分开的距离 Δy , $\Delta y = [S(M + 1) \sin \theta] / M$, 其中 M 为针孔成像的放大率, S 为相邻针孔之间的间距, 由狭缝选取 X 光源不同的位置, 从而重建出 X 光源的原始图像。像元重排和不同像元交界处由计算机处理, 一般采用平滑技术。

分幅图像的数目由条纹相机的时间分辨决定。系统的视场受到针孔阵列的倾斜角 θ 、条纹相机狭缝长度 L 、针孔个数 N 和放大率 M 的限制, 垂直视场的大小为 $V = N \Delta y = [NS(M + 1) \sin \theta] / M$, 水平视场的大小为 $P = L / (MN)$, 为了避免图像之间的重叠, 要求 X 光源的大小 R 必须满足条纹 $R < S(M + 1) / M$ 。

设计加工的九针孔阵列主要指标是: 针孔板材料为铪(Hf), 厚 20 μm , 直径 $D = 10 \mu\text{m}$,

针孔的个数 $N = 9$, 相邻针孔的间距 $S = 400 \mu\text{m}$, 倾斜角 $\theta = 5.5^\circ$. 放大倍数 $M = 6.9$. 条纹相机主要指标为: 狭缝长度 $L = 30 \text{ mm}$, 狭缝宽度为 $d_s = 100 \mu\text{m}$, 时间分辨约 6.5 ps (最快档), 空间分辨 $d_k = 100 \mu\text{m}$. 于是得到该成像系统的视场为 $470 \mu\text{m} \times 410 \mu\text{m}$. 由上述针孔阵列和条纹相机的参数, 可得到该系统的空间分辨率: 横向分辨率为 $\Delta r_x = (\Delta r_{\text{PH}}^2 + \Delta r_{\text{kx}}^2)^2$, 其中 $\Delta r_{\text{kx}} = d_k/M$, $\Delta r_{\text{PH}} = D(1 + 1/M)$ 为针孔的分辨率; 纵向空间分辨率为 $\Delta r_y = (\Delta r_{\text{PH}}^2 + \Delta r_{\text{ky}}^2)^2$, 其中 $\Delta r_{\text{ky}} = d_s/M$. 于是得到, $\Delta r_x = \Delta r_y = 18.3 \mu\text{m}$.

在“星光”装置上进行实验。激光参数为: 能量约 13 J , 脉宽约 700 ps , 焦斑约 $200 \mu\text{m}$, 激光正入射打击金平面靶。得到的多针孔图像如图 1 所示, 图像水平方向是条纹相机的狭缝方向, 垂直方向是时间扫描方向。由图可见, 基本上得到 9 个针孔的扫描图像, 但是针孔线阵的位置略高, 使得垂直方向上方的图像超过靶上方等离子体的大小, 而没有记录完整靶下方等离子体的图像。沿时间扫描方向的中心位置取为时刻 t (见图 1 中右边的一短横线的位置), 经过计算机图像处理, 即组合与平滑处理后重建出 t 时刻的二维图像, 见图 2 的等值线图。如取其它时刻, 同样可得到另一时刻的二维图像。

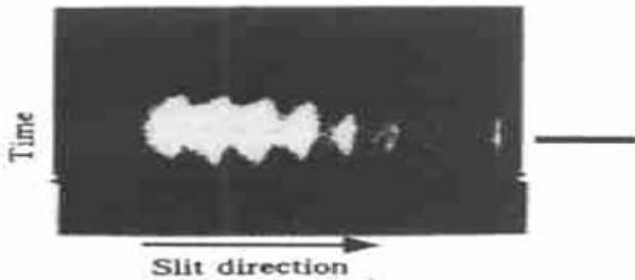


Fig. 1 Streak images from nine pinhole array



Fig. 2 Two-dimensional image reconstructed from Fig. 1

通过本项研究工作, 得到的结论是: 所完成的针孔线阵配 X 光条纹相机的成像系统, 得到了一种高时间分辨(约 5 ps) 的空间成像技术, 经过实验的考核后, 表明此技术可以用于惯性约束聚变的内爆压缩所需高时间分辨成像的测量研究。

参 考 文 献

- [1] Kilkenny J D. High speed proximity focused X-ray cameras. *Laser and Particle Beams*, 1991, **9**(1) : 49~60
- [2] Landen O L. High-resolution time- and two-dimensional speed-resolved X-ray imaging of plasmas at NOVA. *Rev. Sci. Instrum.*, 1992, **63**(10) : 5075~ 5078
- [3] Shiraga H, Heya M, Fujishima A *et al.*. Laser-imploded core structure observed by using two-dimensional X-ray imaging with 10-ps temporal resolution. *Rev. Sci. Instrum.*, 1995, **66**(1) : 722~ 724
- [4] Heya M, Nakasuji M, Shiraga H *et al.*. Time-resolved, two-dimensional electron-temperature distribution of laser-imploded core plasmas. *Rev. Sci. Instrum.*, 1997, **68**(1) : 820~ 823