

文章编号: 1001-3806(2017)01-0006-04

基于球面晶体背光成像系统的性能模拟研究

刘利锋¹, 肖沙里², 钱家渝²

(1. 大同大学 物理与电子科学学院, 大同 037009; 2. 重庆大学 光电技术及系统教育部重点实验室, 重庆 400030)

摘要: 为了实现球面晶体背光成像、验证球面晶体背光成像系统性能, 采用模拟软件 SHADOW 对该背光成像系统进行了模拟研究, 并对实际成像过程中影响系统成像的探测器位置、背光源的大小等参量进行了模拟分析。结果表明, 探测器位置的微小变化对成像系统的相对放大率影响较小; 背光源越小, 成像系统的空间分辨率越高。该成像系统具有很好的空间分辨率, 系统性能稳定可靠。

关键词: X 射线光学; 球面晶体; X 射线成像; 相对放大率; 空间分辨率

中图分类号: O434.1 **文献标志码:** A **doi:**10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2017.01.002

Performance simulation of backlight imaging system based on spherical crystal

LIU Lifeng¹, XIAO Shali², QIAN Jiayu²

(1. School of Physics and Electronics Science, Datong University, Datong 037009, China; 2. Key Laboratory of Optoelectronic Technology and System of Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

Abstract: In order to realize the work of X-ray imaging system and testify the performance of the imaging system, the backlighting imaging system was studied by ray tracing simulation software SHADOW. By the simulation of system parameters (detection position, the size of backlighting source), the results show that the position of detection has a little influence on the relative magnification of the system. The spatial resolution of the X-ray imaging system is higher with the decrease of the size of backlighting source. The imaging system based on spherically bent crystal has high spatial resolution and better performance.

Key words: X-ray optics; spherical crystal; X-ray imaging; relative magnification; spatial resolution

引言

在惯性约束聚变实验中, 高功率的激光脉冲照射靶丸, 激光与靶丸表面物质相互作用, 产生高温等离子体。要了解高温等离子体内部的状态及等离子体内粒子间相互作用的过程, 就必须对等离子体中各种离子和电子的参量进行测量。高温等离子体中的 X 射线含有电子温度、电子密度、温度梯度、密度梯度和等离子体不透明度等状态参量^[1-6]。此外, 通过 X 射线辐射靶丸, 还可以评估激光辐射靶丸的对称性等。所以, X 射线诊断技术是惯性约束聚变高温等离子体诊断的一种重要方法。

目前, X 射线诊断技术主要包括针孔成像、菲涅耳波带片、Kirkpatrick-Baez 显微成像技术以及球面晶体成像技术等^[7-8]。针孔成像空间分辨率比较低, Kirkpatrick-Baez 显微成像技术等需要掠入射, 入射角要求

非常小, 调节难度比较大。球面晶体成像可以同时实现能谱分辨、空间分辨等, 且与其它成像技术比, 具有更高能谱分辨和空间分辨^[9-10], 可用于箍缩聚爆和激光等离子体内爆过程与不稳定性的研究。

本文中根据球面晶体成像特性的研究, 设计了球面晶体成像系统, 为了实现球面晶体背光成像系统工作, 验证成像系统性能和优化成像结构, 利用模拟软件 SHADOW 对该背光成像系统在实际成像中影响成像系统的参量进行了模拟研究。

1 球面晶体成像特性

球面晶体基于 X 射线布喇格衍射条件, 只有满足以下条件 X 射线才会被反射:

$$n\lambda = 2d\sin\theta \quad (1)$$

式中, n 是衍射级次, λ 是 X 射线波长, d 是晶格间距, θ 是布喇格角。

球面晶体成像原理如图 1 所示。点光源发出的 X 射线满足布喇格衍射条件被球面晶体反射后, 形成了两个焦点: 分别是距离球面晶体 q_m 的子午面焦点 F_m 和距离球面晶体 q_s 的弧矢面焦点 F_s , 球面晶体子午和弧矢方向的弯曲半径分别为 R_m 和 R_s , 则:

作者简介: 刘利锋(1981-), 男, 博士, 讲师, 现主要从事光电探测、X 射线诊断等研究。

E-mail: liulif1305@equ.edu.cn

收稿日期: 2015-12-21; 收到修改稿日期: 2016-01-13

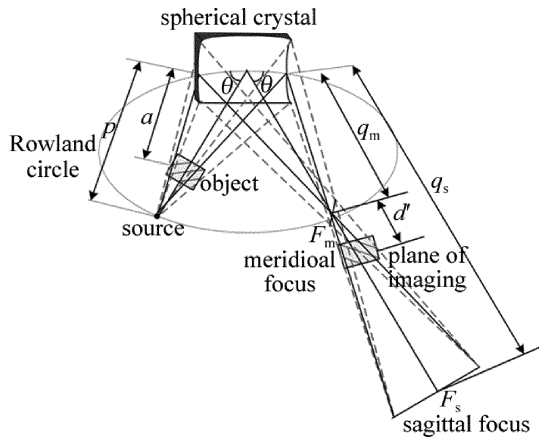


Fig. 1 Backlight imaging of spherical crystal

$$q_m = \frac{pR_m \sin\theta}{2p - R_m \sin\theta} \quad (2)$$

$$q_s = \frac{pR_s}{2p \sin\theta - R_s} \quad (3)$$

式中,光源到球面晶体的距离为 p 。子午面和弧矢面上成像系统分别满足^[11]:

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{q_m} = \frac{2}{R_m \sin\theta} \quad (4)$$

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{q_s} = \frac{2 \sin\theta}{R_s} \quad (5)$$

式中, R_m 是球面晶体的弯曲半径。

在距离子午面焦点 F_m 为 d' 的位置,可以得到最佳成像(子午面和弧矢面的放大率相同)。距离 d' 为^[12]:

$$d' = \frac{q_s q_m - q_m^2}{q_s + q_m} \quad (6)$$

子午面和弧矢面上的放大率为^[13]:

$$M_m = \frac{p}{q_m} \frac{d'}{p - a} \quad (7)$$

$$M_s = \frac{p}{q_s} \frac{q_s - (q_m + d')}{p - a} \quad (8)$$

式中, a 为成像物体到球面晶体的距离。

最佳成像位置 d' 与子午面和弧矢面的焦距相关,

与成像系统中成像物体的放置无关。而系统的放大率与 d' 和成像物体位置有关。如果成像系统结构确定后,最佳成像位置 d' 就确定,只能通过移动成像物体,来调节系统的放大率。

2 球面晶体背光成像系统的模拟

基于球面晶体成像特性,设计了球面晶体背光成像系统并应用于等离子体的成像诊断实验。在实际成像实验中,背光源放置于靶腔中央位置,背光成像系统可以按照成像光路放置球面晶体,但探测器的位置无法达到理论位置。背光源也不是理论上的点光源,而是存在一定的尺度。这些参量的变化都会影响到最后的成像,为了验证球面晶体成像系统的性能,利用模拟软件 SHADOW 对影响成像的参量进行了模拟研究。

2.1 探测器位置对放大率的影响

对于球面晶体背光成像系统,理论上探测器应该放置在最佳成像位置处。实际上由于实验环境等限制,探测器位置会偏离理论位置 $\Delta d'$,存在几何焦深,产生调焦误差^[14-15]。为了验证成像系统探测器位置的变化对最后成像结果的影响,分析探测器位置的改变对系统放大率 M 的影响。利用模拟软件 SHADOW 分析探测器位置变化量 $\Delta d'$ 对相对放大率 ($\Delta M/M$) 的影响。为了便于模拟,假设成像系统中参量 a, p, R 和 θ 都是定值,探测器位置的变化量 $\Delta d'$ 与放大率 M 变化量 ΔM 的关系为:

$$\Delta M = \left(\frac{\partial M}{\partial b} \right)_{a,p,R,\theta} \Delta d' \quad (9)$$

根据子午面的放大率公式(7)式,得到子午面放大率变化量 ΔM 为:

$$\Delta M = \frac{\Delta d'}{p - a} \quad (10)$$

子午面放大率相对变化 ($\Delta M/M$) _{a,p,R,θ} 为:

$$\left(\frac{\Delta M}{M} \right)_{a,p,R,\theta} = \frac{\Delta d'}{p - a} \frac{p - a}{d'} = \frac{\Delta d'}{d'} \quad (11)$$

Table 1 Results between magnification rate and $\Delta M/M$

| parameters of imaging system | | | | M | | $\Delta M/M$ | | | |
|------------------------------|-------------|-------------|---------------------|-------------------|-------------------|--------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| Bragg angle/ ($^\circ$) | R / mm | p / mm | $\Delta d'$ / mm | meridian plane | sagittal plane | simulation results | | calculation | |
| | | | | | | meridian plane | sagittal plane | meridian plane | sagittal plane |
| | | | 0 | 2 | 2 | | | | |
| 57 | 200 | 167.7 | -3 | 1.92 | 2.03 | -4% | 1.5% | -4.2% | 1.7% |
| | | | 3 | 2.08 | 1.97 | 4% | -1.5% | 4.2% | -1.7% |
| | | | 0 | 1.5 | 1.5 | | | | |
| 65 | 200 | 181.3 | -3 | 1.39 | 1.57 | -7.3% | 4.7% | -7.6% | 4.9% |
| | | | 3 | 1.61 | 1.43 | 7.3% | -4.7% | 7.6% | -4.9% |

同样,弧矢面放大率相对变化 $(\Delta M/M)_{a,p,R,\theta}$ 为:

$$\left(\frac{\Delta M}{M}\right)_{a,p,R,\theta} = \frac{-\Delta d'}{p-a} \frac{p-a}{q_s - q_m - d'} = -\frac{\Delta d'}{q_s - q_m - d'} \quad (12)$$

表1是探测器位置变化量 $\Delta d'$ 与放大率相对变化 $(\Delta M/M)_{a,p,R,\theta}$ 模拟和计算结果。模拟两个背光成像系统,一个是球面晶体弯曲半径200mm,布喇格角为 57° ,放大率为2;另一个是球面晶体弯曲半径200mm,布喇格角为 65° ,放大率为1.5;探测器位置变化量 $\Delta d' = \pm 3\text{mm}$ 。模拟结果表明,两成像系统子午面上得到的放大率相对变化 $(\Delta M/M)_{a,p,R,\theta}$ 分别为 $\pm 4\%$ 和 $\pm 7.6\%$;弧矢面上相对变化分别为 $\pm 1.5\%$ 和 $\pm 4.7\%$ 。而通过(11)式和(12)式得到两个成像系统子午面的 $(\Delta M/M)_{a,p,\theta}$ 分别为 $\pm 4.2\%$ 和 $\pm 7.6\%$;弧矢面相对放大率分别为 $\pm 1.7\%$ 和 $\pm 4.9\%$ 。由模拟结果与公式计算结果可知,探测器位置变化很大,但子午面和弧矢面上放大率变化却很小。

2.2 光源尺寸对空间分辨率的影响

球面晶体背光成像系统理论上光源近似为点光源,但是在实际实验中,光源尺寸不可能为点光源,如箍缩负载丝阵尺寸为几百个微米。当使用一个真正的光源(有尺寸的光源),对成像系统的空间分辨率产生影响。为了分析成像系统中光源尺寸对空间分辨率的影响,利用模拟软件SHADOW来模拟不同光源尺寸的背光成像系统,文中分别模拟了两个不同的背光成像系统,背光源光源直径分别为 $15\mu\text{m}$, $20\mu\text{m}$ 和 $30\mu\text{m}$ 。

图2是布喇格角为 57° 、球面晶体弯曲半径为100mm的成像系统分别在3种不同光源尺寸的情况下,成像面上分别得到的相应背光网格成像。

表2是在不同尺寸的背光源,两个背光成像系统得到的子午面和弧矢面空间分辨率的结果。两个成像系统中球面晶体弯曲半径分别为100mm和200mm,布喇格角分别为 57° 和 65° ,两成像系统的放大率都为 $M=1.5$ 。子午面得到的空间分辨率都小于 $15\mu\text{m}$ 。模

Table 2 Spatial resolution of two backlighting system

| imaging system | the size of source/ μm | spatial resolution | |
|---|-----------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| | | meridian plane/ μm | sagittal plane/ μm |
| $\theta = 57^\circ, R = 100\text{mm}$ $p = 84\text{mm}, a = 60.4\text{mm}$ | 15 | 8 | 14.5 |
| | 20 | 9.5 | 19 |
| | 30 | 11 | 28.6 |
| $\theta = 65^\circ, R = 200\text{mm}$ $p = 181.3\text{mm}, a = 155\text{mm}$ | 15 | 10 | 14.9 |
| | 20 | 13 | 19.5 |
| | 30 | 15 | 29 |

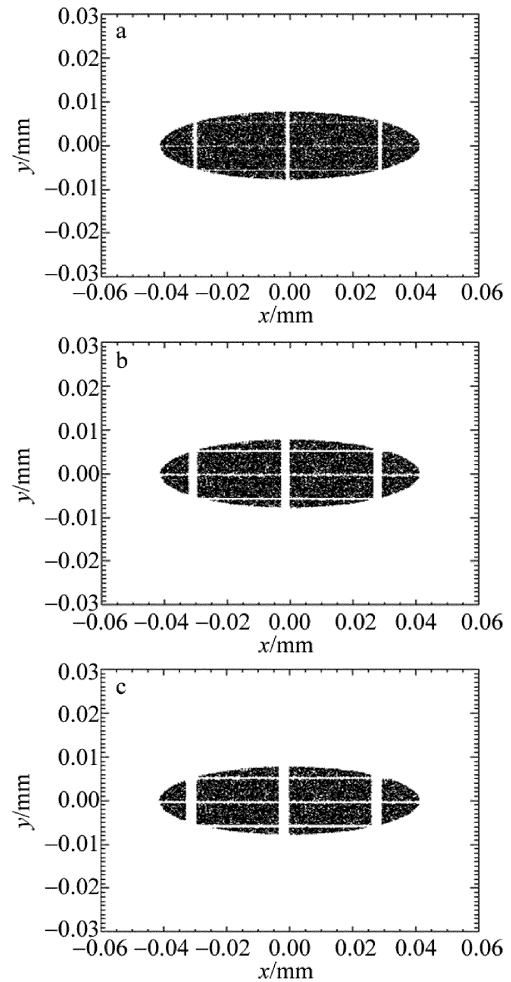


Fig. 2 Imaging system with different source sizes($\theta = 57^\circ, R = 100\text{mm}$)
a—the size of source: $15\mu\text{m}$ b—the size of source: $20\mu\text{m}$ c—the size of source: $30\mu\text{m}$

拟结果表明:不同的背光成像系统,空间分辨率与光源尺寸的大小重要的关系,光源尺寸越小,子午面和弧矢面的空间分辨率越高。使用点光源得到的背光成像的空间分辨率要高于有尺寸大小的光源。对于所有的背光成像,得到的成像空间分辨率都是小于光源的尺寸。

3 结论

球面晶体背光成像系统,不仅可以得到X射线能谱信息,也可以得到X射线2维成像,是一种重要的X射线背光诊断技术。根据球面晶体成像特性,设计了球面晶体背光成像系统,为了能够实现成像系统的实用,验证了该成像系统的性能,利用模拟软件SHADOW对实际成像实验中影响成像系统的相关参量,探测器的位置、背光源尺寸大小进行了模拟研究。模拟结果表明:探测器位置变化对成像系统影响很小;背光源的尺寸大小影响成像系统空间分辨率。

参 考 文 献

- [1] GLENZER S H, MACGOWAN B J, MEEZAN N B, *et al.* Demonstration of ignition radiation temperatures in indirect-drive inertial confinement fusion hohlraums [J]. *Physical Review Letters*, 2011, 106(8): 085004.
- [2] SINARS D B, BENNETT G R, WENGER D F, *et al.* Monochromatic X-ray imaging experiments on the Sandia National Laboratories Z facility (invited) [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2004, 75(10): 3672-3677.
- [3] SINARS D B, BENNETT G R, WENGER D F, *et al.* Evaluation of bent-crystal X-ray backlighting and microscopy techniques for the Sandia Z machine [J]. *Applied Optics*, 2003, 42(19): 4059-4071.
- [4] FUJIOKA S, FUJIWARA T, TANABE M, *et al.* Monochromatic X-ray radiography for areal-density measurement of inertial fusion energy fuel in fast ignition experiment [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2010, 81(10): 10E529.
- [5] AGLITSKIY Y, KARASIK M, VELIKOVICH A L, *et al.* Classical and ablative Richtmyer-Meshkov instability and other ICF relevant plasma flows diagnosed with monochromatic X-ray imaging [J]. *Physica Scripta*, 2008, 132(19): 2517-2530.
- [6] BITTER M, HILL K W, STRATTON B, *et al.* Spatially resolved spectra from a new X-ray imaging crystal spectrometer for measurements of ion and electron temperature profiles (invited) [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2004, 75(10): 3660-3665.
- [7] KOCH J A, AGLITSKIY Y, BROWN C, *et al.* 4.5 and 8keV emission and absorption X-ray imaging using spherically bent quartz 203 and 211 crystal [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2003, 74(3): 2130-2135.
- [8] BENNETT G R, SINARS D B, WENGER D F, *et al.* High-brightness, high-spatial-resolution, 6.151keV X-ray imaging of inertial confinement fusion capsule implosion and complex hydrodynamics experiments on Sandia's Z accelerator (invited) [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2006, 77(10): 10E322.
- [9] LIU L F, XIAO S L, QIAN J Y, *et al.* X-ray backlight imaging in Z-pinch [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section*, 2012, A684(11): 93-96.
- [10] KOCH J A, LANDEN O L, BARBEE T W, *et al.* High-energy X-ray microscopy techniques for laser-fusion plasma research at the national ignition facility [J]. *Applied Optics*, 1998, 37(10): 1784-1795.
- [11] KOCH J A, LANDEN O L, HAMMEL B A, *et al.* Recent progress in high-energy, high-resolution X-ray imaging techniques for application to the National Ignition Facility [J]. *Review of Scientific Instruments*, 1999, 70(1): 525-530.
- [12] SANCHEZ del Rio M, ALIANELLI L, PIKUZ T A, *et al.* Anovel imaging X-ray microscope based on a spherical crystal [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2001, 72(8): 3291-3303.
- [13] BENNETT G R, SMITH I C, SHORES J E, *et al.* 2~20ns inter-frame time 2-frame 6.151keV X-ray imaging on the recently upgraded Z accelerator: A progress report [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2008, 79(10): 10E914.
- [14] LIPSON A, LIPSON S G, LIPSON H. *Optical physics* [M]. 4th ed. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2010: 325-330.
- [15] MCLEAN I S. *Electronic imaging in astronomy: detectors and instrumentation* [M]. Chichester, UK: Praxis Publishing Ltd., 2008: 52-60.