

## 亚微米分辨率 Wolter 显微镜的设计

李亚冉<sup>1,2\*</sup><sup>1</sup>中国科学院智能红外感知重点实验室, 上海 200083;<sup>2</sup>中国科学院上海技术物理研究所红外探测与成像技术重点实验室, 上海 200083

**摘要** 受限于初始构型和光学加工能力, 现有 X 射线成像诊断设备的最优空间分辨率被限制在 3~5  $\mu\text{m}$ 。提出一种基于开放式 Wolter 构型的亚微米分辨率 X 射线显微镜。详细介绍了显微镜的光学结构、设计方法和关键参数。提出一种适用于 Rayleigh-Taylor 不稳定性诊断的大视场、高分辨率 X 射线显微镜的光学设计方案。开展了基于光线追迹的构型验证、像质仿真和系统响应效率评价。显微镜设计工作能点为 2.5 keV, 有效视场为  $\pm 0.35$  mm, 在全视场范围内空间分辨率优于 1  $\mu\text{m}$ , 几何集光立体角为  $3.73 \times 10^{-5}$  sr, 峰值响应效率为  $1.52 \times 10^{-5}$  sr。

**关键词** X 射线光学; 惯性约束聚变; 等离子体诊断; Rayleigh-Taylor 不稳定性; Wolter; 多层膜

中图分类号 O434

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS221492

## 1 引言

在激光惯性约束聚变过程中, 原始尺度在几百微米至毫米量级的氘氚燃料靶丸在极短的时间内被压缩至几十微米, 达到类似星球内部的高温、高压状态<sup>[1-3]</sup>。高精密的 X 射线成像诊断设备已经成为深入理解内爆过程和量化反演内爆参数的关键, 在辐照均匀性、内爆压缩对称性、流体力学不稳定性以及燃料混合等问题的研究中发挥了重要作用<sup>[4-6]</sup>。

目前, 得到应用的 X 射线成像类诊断设备主要包括针孔相机、Kirkpatrick-Baez (KB) 显微镜、Wolter 显微镜及球面弯晶等<sup>[7-14]</sup>。受初始构型和光学加工能力的制约, 现有诊断设备的空间分辨率被限制在 3~5  $\mu\text{m}$ , 有效视场被限制在百微米至毫米量级。进一步提升 X 射线成像诊断的空间分辨率, 有助于精细刻画内爆热斑的二维结构, 并在小振幅、高空间频率平面调制样品的 Rayleigh-Taylor (RT) 不稳定性研究中发挥重要作用<sup>[15-16]</sup>。

Wolter 显微镜构型兼具高空间分辨率和高集光效率的特点, 是开展高精密 X 射线成像诊断的理想光学构型。Wolter 显微镜构型最早由德国物理学家 Wolter<sup>[17]</sup> 提出, 其中的 Wolter-I 型被广泛应用到 Chandra、XMM-Newton、NuSTAR 以及我国的 eXTP 等 X 射线天文望远镜项目, 用于开展角秒级精度的天文观测<sup>[18-19]</sup>。20 世纪 70 年代起, 采用旋转双曲面和旋转椭球面组合的 Wolter 显微镜构型开始应用于有限

工作距离的激光聚变研究, 在 Shiva、Nova 等装置上开展的内爆过程观测和流体力学不稳定性研究中发挥重要作用。典型系统的几何集光立体角为  $3.9 \times 10^{-4}$  sr, 空间分辨率在 5  $\mu\text{m}$  量级<sup>[20-21]</sup>。2018 年前后, 有学者提出通过应用天文望远镜的技术为 Z 箍缩装置和 NIF 装置研制高能点响应的 Wolter 显微镜, 但提供的是 5 mm 量级的大视场和 60~300  $\mu\text{m}$  的空间分辨率<sup>[22-23]</sup>。此外, 也有报道将 Wolter 显微镜构型应用到基于同步辐射光源的 X 射线荧光成像和生物样品成像等<sup>[24-27]</sup>。由于受到结构形式、响应效率、视场范围以及应用场景等的限制, 用于 X 射线荧光成像和生物样品成像的 Wolter 显微镜与本文探讨的用于激光惯性约束聚变诊断的亚微米级分辨率 Wolter 显微镜有显著差异。

直接将 Wolter 显微镜构型应用于有限工作距离的激光聚变研究具有较大的技术难度, 如 Wolter 显微镜的口径被限制在 4~140 mm, 远小于 Wolter-I 型天文望远镜的有效口径。由于在有效口径、应用场景以及使用目标等方面存在巨大差异, Wolter 显微镜难以直接应用相对成熟的天文望远镜研制经验。设计和加工这种小口径封闭式内表面反射镜具有较大的技术难度, 目前主要依赖单点金刚石车削和芯轴复制法获得<sup>[28]</sup>。以往的研制经验表明, 如果难以获得理想的反射镜面形和表面粗糙度, 将难以发挥出 Wolter 显微镜构型的高分辨成像优势。

本文提出一种适用于激光聚变研究的亚微米分辨率 Wolter 显微镜设计方案。通过进一步改进 Wolter

收稿日期: 2022-07-18; 修回日期: 2022-08-08; 录用日期: 2022-08-31; 网络首发日期: 2022-09-10

基金项目: 国家自然科学基金(11905281)

通信作者: liyaran@mail.sitp.ac.cn

构型,采用原旋转二次曲面镜的部分扇面构建系统,将原本不可直接加工的封闭内表面转变为可供精密加工的外表面。改进构型具备原构型的技术特点,同时能够满足超精密光学加工、检测及镀膜等的工艺要求。本文进一步提出一组适用于 Rayleigh-Taylor 不稳定性诊断的显微镜光学结构参数,通过光线追迹验证了系统构型、空间分辨率和响应效率等。

## 2 基本光学结构

### 2.1 光学结构

Wolter 显微镜构型采用同轴共焦的旋转双曲面和旋转椭球面实现对有限远目标成像。对于轴上点,根据二次曲面性质可以实现消球差成像,即理论上中心视场具备接近衍射限的超高分辨率成像能力。对于轴外视场,Wolter 构型基本满足阿贝正弦条件,可以有效

减小彗差缺陷,改善边缘视场像质。此外,Wolter 构型具有高集光效率的特点,几何集光立体角可达  $10^{-4} \sim 10^{-3}$  sr,显著优于其他掠入射构型。

本文提出一种改进型的开放式 Wolter 构型,用于解决原构型在超光滑内表面反射镜加工、检测及镀膜等方面面临的难题。采用旋转二次曲面镜的部分扇区构建开放式系统,光学结构如图 1 所示,其显著优点是将原本难以直接加工、检测和镀膜的封闭式内表面转变为开放式外表面。初步估算,采用单点金刚石车削、离子束抛光及弹性喷射加工等组合抛光法可以获得有效长度为  $10 \sim 50$  mm、宽度为  $2 \sim 10$  mm、旋转半径大于  $30$  mm 的二次曲面反射镜<sup>[29-30]</sup>,其面形精度可以达到  $\lambda/10 \sim \lambda/100$ ,粗糙度达到  $0.2 \sim 0.5$  nm。在集光效率方面,由于采用部分扇面,系统的几何立体角在  $10^{-6} \sim 10^{-5}$  sr。

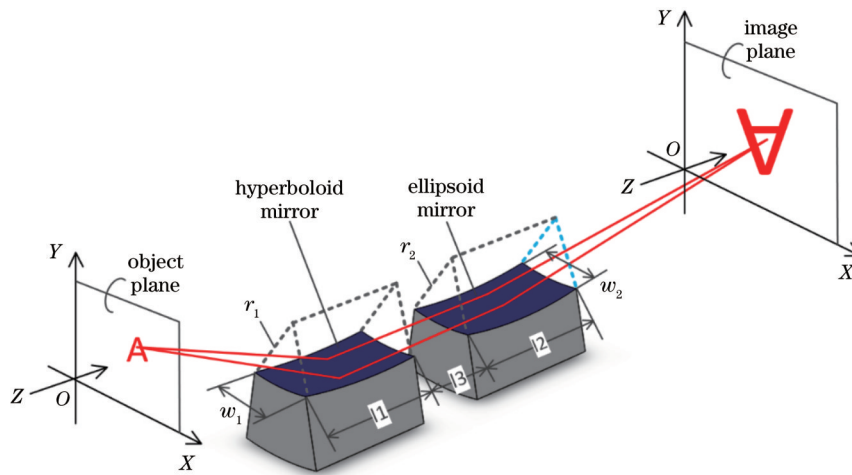


图 1 开放式 Wolter 显微镜的光学构型

Fig. 1 Optical configuration of the open Wolter microscope

### 2.2 构型特性

开放式 Wolter 显微镜的成像光路如图 2 所示。旋转双曲面和旋转椭球面同轴共焦点于  $F_1$ ,从双曲面另一焦点  $F_2$  发出的光线经过双曲面和椭球面的连续反

射后,理想情况下将会聚于椭球面的远端焦点  $F_3$  处。如果在  $F_2$  所在的物平面内放置成像靶标,那么将在  $F_3$  所在的像平面内得到一个倒立放大的实像。

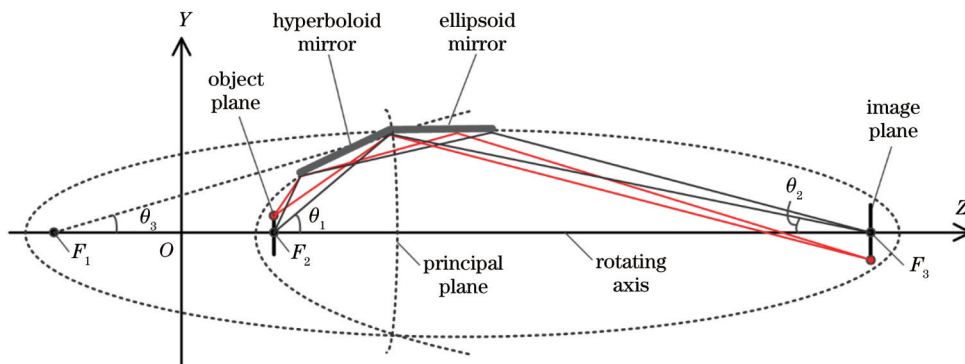


图 2 开放式 Wolter 显微镜的成像光路

Fig. 2 Imaging lightpath of the open Wolter microscope

在此基础上,假设系统的掠入射角为  $\theta_0$ ,放大倍数为  $M$ ,那么,与光学结构参数直接相关的入射光线、出射光线以及反向延长线与旋转轴的夹角可以分别记作  $\theta_1$ 、 $\theta_2$  和  $\theta_3$ ,其计算公式分别为

$$\theta_1 = \frac{4M}{M+1} \theta_0, \quad (1)$$

$$\theta_2 = \frac{4}{M+1} \theta_0, \quad (2)$$

$$\theta_3 = \frac{2(M-1)}{M+1} \theta_0. \quad (3)$$

进一步可以得出双曲面镜和椭球面镜的离心率  $e_1$  和  $e_2$ :

$$e_1 = \frac{\sin(\theta_1 - \theta_3)}{\sin \theta_1 - \sin \theta_3}, \quad (4)$$

$$e_2 = \frac{\sin(\theta_2 + \theta_3)}{\sin \theta_2 + \sin \theta_3}. \quad (5)$$

在此基础上,可以进一步计算出开放式 Wolter 构型的几何集光立体角。

$$\Omega_{\text{geo}} = \frac{\omega L_1 \sin \theta_0}{u^2}, \quad (6)$$

式中: $\omega$  为镜宽; $L_1$  为双面镜的镜长; $u$  为双曲面镜的物距,定义为从物点到双曲面镜中心的距离。考虑了双镜反射率的有效集光效率可以表示为

$$\Omega_{\text{eff}} = \Omega_{\text{geo}} \eta_1 \eta_2 = \frac{\omega L_1 \eta_1 \eta_2 \sin \theta_0}{u^2}, \quad (7)$$

式中: $\eta_1$  和  $\eta_2$  分别为双曲面镜和椭球面镜的反射率。

在几何像差方面,开放式 Wolter 构型主要受场曲、彗差等离轴像差的影响。开放式构型打破了原构型的轴对称性,采用部分反射镜参与成像,具有更小的离轴像差。通过开展基于成像光路的几何像差分析,

开放式 Wolter 构型的离轴像差可表示为

$$Y \approx L_1 \left( K_1 \sigma + \frac{K_2}{\theta_0} \sigma^2 \right), \quad (8)$$

式中: $\sigma$  为视场角,可以根据物方视场范围  $d$  和物距  $u$  计算得出; $K_1$  和  $K_2$  均为拟合系数。进一步得出,减小系统离轴像差的方法主要包括减小沿轴镜长,扩大物距(在保持物方视场范围不变的前提下,通过增大物距,减小视场角)和增大反射镜的掠入射工作角度。从式(6)可以看出,减小镜长和增大物距会显著降低系统的几何集光立体角。因此,系统的成像能力与集光效率相互制约,需要根据显微镜的应用目标进行参数取舍。

### 3 光学系统设计

#### 3.1 关键参数

开放式 Wolter 构型的关键结构参数主要包括物距、掠入射角、放大倍数和反射镜尺寸。根据式(8),采用大物距、大掠入射角以及小尺寸反射镜有助于达到构型范围内的分辨率上限。同时经过分析,放大倍数对分辨率的影响并不明显。

与传统 Wolter 构型不同,开放式构型对镜长和镜宽有所限制,表 1 和表 2 分别给出了开放式构型中镜长和镜宽对系统性能的影响。其中,镜长的取值范围为 10~25 mm,镜宽的取值范围为 2~15 mm。以  $\pm 0.5$  mm 处边缘视场的像面弥散斑半径方均根误差(RMS)值(已换算到物方)作为系统分辨率的评价标准。相比之下,镜长对分辨率的影响更加明显,而镜宽直接影响到系统的几何集光立体角。开放式构型具备子午方向和弧矢方向的二维成像能力。

表 1 镜长对系统性能的影响

Table 1 Effects of mirror length on system performance

Mirror length /mm	Geometric solid angle /( $10^{-5}$ sr)	RMS blurred circle radius along meridian direction / $\mu\text{m}$	RMS blurred circle radius along sagittal direction / $\mu\text{m}$
10	2.42	0.31	0.39
15	3.73	0.46	0.57
20	5.12	0.62	0.77
25	6.58	0.71	0.94

表 2 镜宽对系统性能的影响

Table 2 Effects of mirror width on system performance

Mirror width /mm	Geometric solid angle /( $10^{-5}$ sr)	RMS blurred circle radius along meridian direction / $\mu\text{m}$	RMS blurred circle radius along sagittal direction / $\mu\text{m}$
2	1.86	0.45	0.55
4	3.73	0.46	0.57
8	7.47	0.50	0.63
15	14.10	0.63	0.81

### 3.2 系统参数

内爆过程中的 RT 不稳定性诊断是一个非线性高增益的瞬态过程,对诊断系统的空间分辨率、有效视场及时间分辨率等技术指标有着较高要求。通常采用正弦调制样品,开展基于直接驱动或间接驱动方式的分解实验研究。根据背光源和探测器布局方位的不同,可以将 RT 诊断分为面向和侧向 X 射线背光照相诊断。前者通过正面记录经过调制靶的条纹对比度,反推出扰动振幅;后者则直接记录扰动增长的外形貌。X 射线显微镜通过耦合分幅相机或单视相

机可以获得约 50 ps 的时间分辨率,实现 RT 不稳定性的高精密时空演化行为诊断。

本研究开展了亚微米级分辨率 X 射线显微镜的系统设计,详细的技术指标汇总如表 3 所示。显微镜的设计工作能点为 2.5 keV,掠入射角为  $2.0^\circ$ ,通过在反射镜表面镀制 Cr/C 周期多层膜实现针对特定能点的大掠入射角和高反射率。系统的物距设计为 250 mm,放大倍数为 35。受多层膜角度带宽限制,系统的有效视场范围约为  $\pm 0.35$  mm。不考虑反射镜效率的几何集光立体角的计算结果为  $3.73 \times 10^{-5}$  sr。

表 3 Wolter 显微镜的系统级技术指标

Table 3 System-level technical specifications of Wolter microscope

Parameter	Nominal object distance /mm	Nominal grazing angle / ( $^\circ$ )	Magnification factor	Energy point /keV	Spatial resolution / $\mu\text{m}$	Field of view /mm	Geometric solid angle /sr
Value	250	2	35	2.5	<1	$\pm 0.35$	$3.73 \times 10^{-5}$

根据式(4)和式(5),可以进一步计算出 Wolter 反射镜的光学结构参数,见表 4。其中,双曲面镜和椭球面镜中心点到物点的距离分别为 240.5 mm 和 260.2 mm,双曲面镜和椭球面镜的镜长分别为 15.0 mm 和 16.3 mm,镜宽均为 4 mm。

表 4 Wolter 反射镜的光学结构参数

Table 4 Optical parameters of Wolter reflecting mirror

Parameter	Hyperboloid mirror	Ellipsoid mirror
Object distance /mm	240.5	260.2
Grazing angle /( $^\circ$ )	2.059	1.983
Half-axis length $a$	133.0	4634.2
Half-axis length $b$	12.6	74.3
Mirror length /mm	15.0	16.3
Mirror width /mm	4.0	4.0
Turning radius /mm	33.2	34.5

## 4 光学性能评价

### 4.1 空间分辨率

通过光线追迹完成对上述开放式 Wolter 显微镜的结构参数验证和成像性能评价。在  $\pm 0.7$  mm 的视场范围内,不同视场位置的点目标对应的像面散点图如图 3 所示。散点图的形态及分布规律直接体现了系统的几何像差。同时,图 3 也给出了各散点图对应的弥散斑半径 RMS 值,作为系统分辨率的参考。开放式 Wolter 构型对中心视场理想成像,边缘视场主要受离轴像差影响,随着视场范围扩大,像质有所下降。

除了受离轴像差影响,系统的空间分辨率还受到反射镜面形误差、粗糙度、衍射效应及系统装调误差等因素的影响。由于各影响因素相互独立,可以进一步

建立起成像系统的空间分辨率预估模型。经过分析,显微镜中心视场的分辨率主要受反射镜面形精度的影响,边缘视场的分辨率主要受离轴像差的影响。因此,为了获得全视场的最优分辨率,需要通过开展光学系统设计,以最大限度地减小离轴像差,同时优化超光滑反射镜的加工工艺,获得符合指标要求的面形精度和粗糙度。

图 4 所示为反射镜面形对系统空间分辨率的影响。其中:黑色实线为不考虑反射镜面形精度和粗糙度的理想情况,表示系统的离轴像差;点线表示基于开放式构型,现阶段所能达到的技术水平,对应的斜率误差为  $1 \mu\text{rad}$ ,面形精度为  $\lambda/43$ ,粗糙度为 0.3 nm。在此条件下,系统中心视场的空间分辨率约为  $0.63 \mu\text{m}$ ,在  $\pm 0.59$  mm 的视场范围内空间分辨率优于  $1 \mu\text{m}$ 。图 4 还给出了反射镜的斜率误差为 0.5、2、4  $\mu\text{rad}$  条件下的空间分辨率,对应的面形精度分别为  $\lambda/85$ 、 $\lambda/21$  和  $\lambda/11$ 。当面形精度达到  $\lambda/85$  时,面形对分辨率的影响与衍射效应相当,系统达到衍射受限。

开放式 Wolter 显微镜沿光轴方向的像质变化如图 5 所示,其中黑色实线为不考虑面型和粗糙度的理想情况。可以看到:物点在  $\pm 0.17$  mm 的偏移范围内,系统的空间分辨率仍然优于  $1 \mu\text{m}$ ;当物点的沿轴定位精度为  $\pm 0.05$  mm 时,对空间分辨率的影响约为  $0.04 \mu\text{m}$ 。目前,基于双目视觉的物点指示定位系统可以达到沿轴 10~20  $\mu\text{m}$  的定位精度,已经可以满足系统对高精度目标指示的需求。

采用同样的方法,可以得出采用相同光学结构参数的封闭型 Wolter 显微镜的成像水平。由于封闭式 Wolter 反射镜具有很大的加工和检测难度,因此假定反射镜的斜率误差为 4  $\mu\text{rad}$ ,面形精度为  $\lambda/11$ ,粗糙度为 0.5 nm。在此条件下,封闭型系统中心视场的空间分辨率约为  $2.86 \mu\text{m}$ ,在  $\pm 0.59$  mm 的视场范围内空

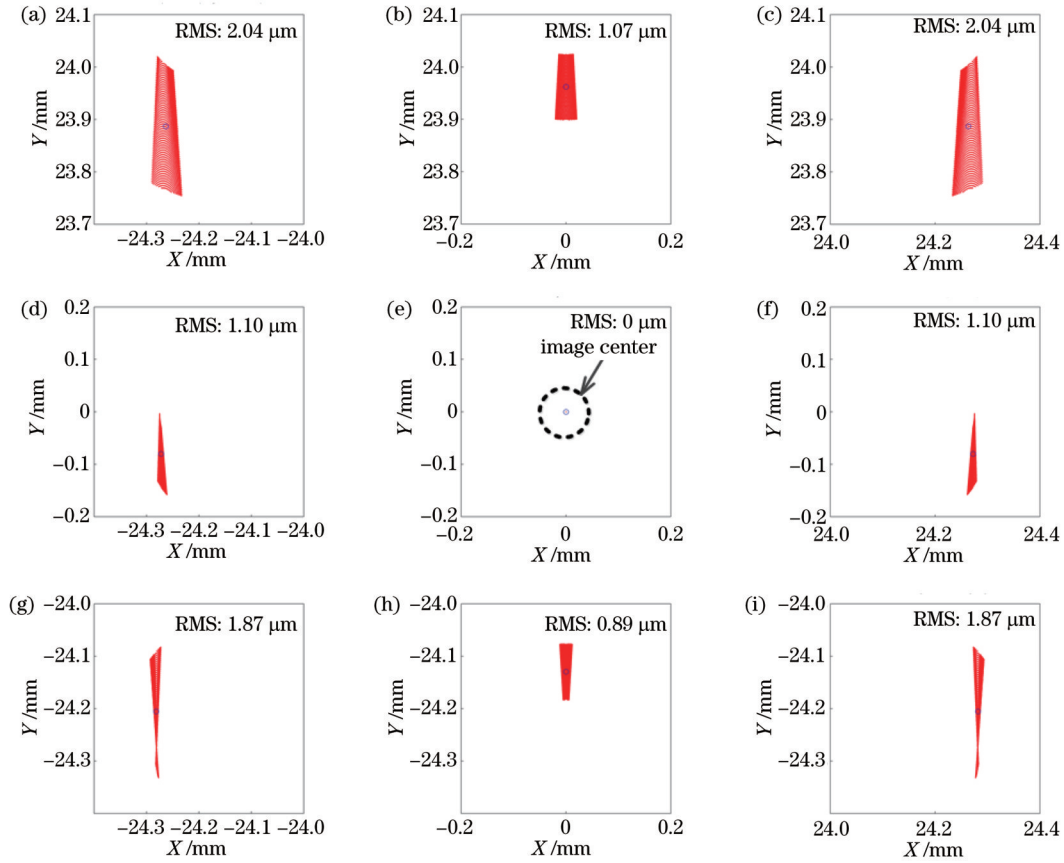


图 3 不同视场位置对应的像面散点图。(a) (0.7, -0.7); (b) (0, -0.7); (c) (-0.7, -0.7); (d) (0.7, 0); (e) (0, 0); (f) (-0.7, 0); (g) (0.7, 0.7); (h) (0, 0.7); (i) (-0.7, 0.7)

Fig. 3 Image spot diagrams for different field of view. (a) (0.7, -0.7); (b) (0, -0.7); (c) (-0.7, -0.7); (d) (0.7, 0); (e) (0, 0); (f) (-0.7, 0); (g) (0.7, 0.7); (h) (0, 0.7); (i) (-0.7, 0.7)

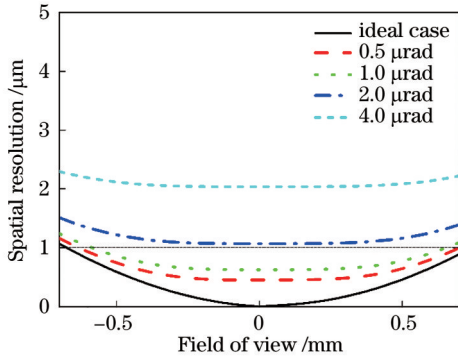


图 4 粗糙度为 0.3 nm 时反射镜面形精度对空间分辨率的影响

Fig. 4 Effects of mirror shape accuracy on spatial resolution under the roughness of 0.3 nm

间分辨率优于  $4.38 \mu\text{m}$ 。在景深方面,封闭型 Woter 显微镜对物点的沿轴变化更为敏感。在  $\pm 0.05 \text{ mm}$  的偏移范围内,系统分辨率为  $7.35 \mu\text{m}$ ;在  $\pm 0.17 \text{ mm}$  的偏移范围内,系统分辨率为  $23.19 \mu\text{m}$ 。因此,相较于原构型,开放式 Wolter 显微镜具有更优的全局空间分辨率和更大的景深,能够有效降低对物点定位精度的要求。

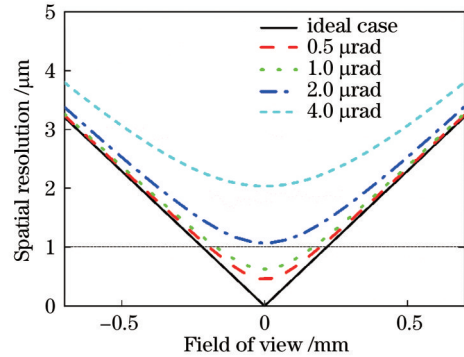


图 5 沿光轴方向系统空间分辨率的变化

Fig. 5 Changes to the system spatial resolution along the optical axis

#### 4.2 系统响应效率

为了实现大掠入射角和高反射率的显微镜系统设计,在反射镜基底表面设计和镀制 Cr/C 周期多层膜,以实现  $2.5 \text{ keV}$  能点的响应。其中,双曲面镜和椭球面镜的中心掠入射角分别为  $2.059^\circ$  和  $1.983^\circ$ ,多层膜的周期厚度分别为  $7.70 \text{ nm}$  和  $8.07 \text{ nm}$ ,厚度比均为 0.5,膜对的数量均为 13。经过仿真计算得到的 Cr/C 周期多层膜反射率曲线如图 6 所示,峰值反射率

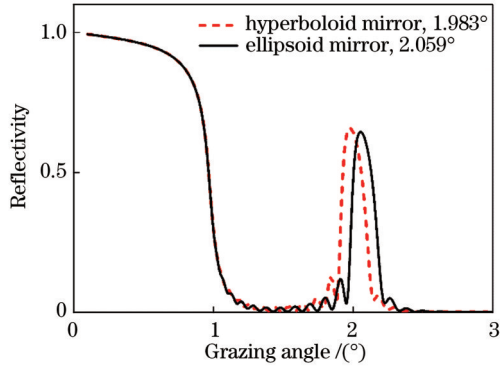


图 6 Cr/C 周期多层膜的反射率曲线

Fig. 6 Reflectivity curves of Cr/C periodic multilayer films

约为 65.7%，角度带宽约为 0.16°，系统对应的有效视场直径约为 0.71 mm。同时可以得到多层膜的能量响应带宽约为 0.23 keV，对应的能量分辨率  $E/\Delta E$  约为 10.9。

结合显微镜的几何集光立体角和多层膜反射率，可以进一步给出系统在 ±0.7 mm 视场范围内有效集光效率，如图 7 所示。显微镜在水平方向可以获得毫米级的大视场，响应效率无明显变化；在竖直方向，有效视场范围受多层膜的角度带宽制约。系统在中心视场的峰值效率约为  $1.52 \times 10^{-5}$  sr，在 ±0.28 mm 的视场范围内响应效率大于  $7.55 \times 10^{-6}$  sr，在 ±0.46 mm 的范围内响应效率大于  $1.74 \times 10^{-6}$  sr。

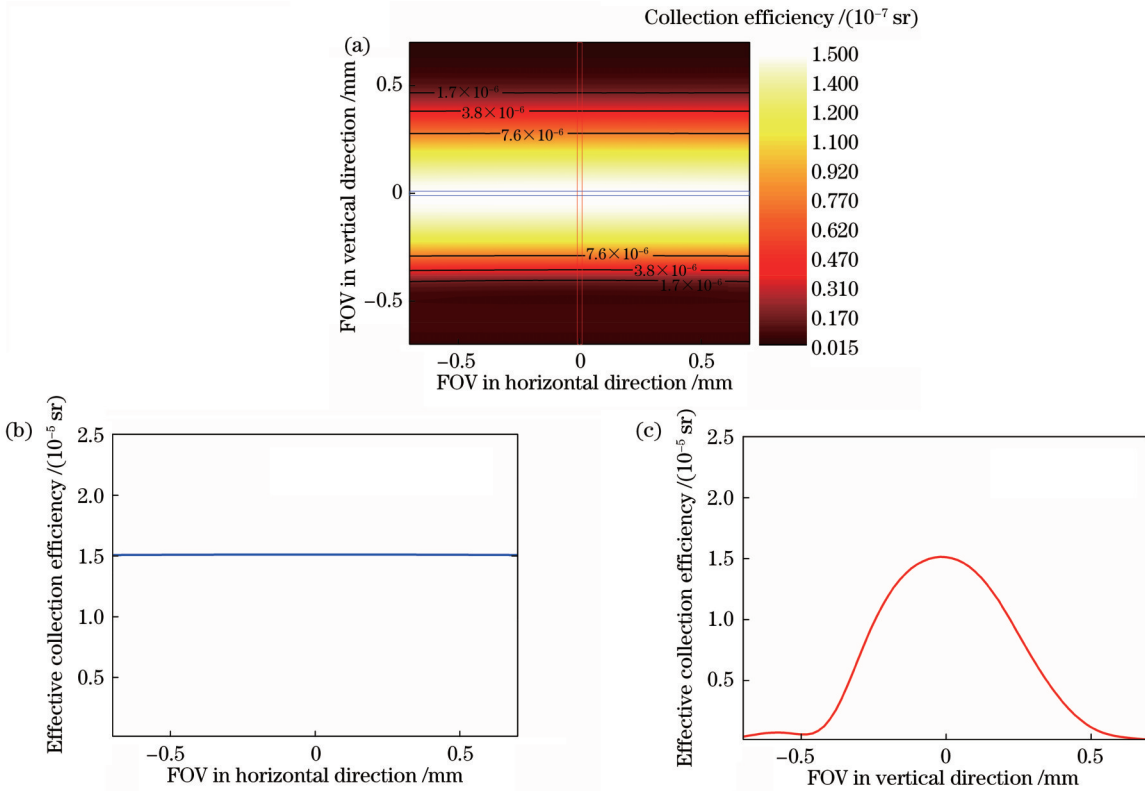


图 7 系统的有效集光效率(考虑了几何集光立体角和多层膜反射率)。(a)总图；(b)水平方向的线轮廓图；(c)竖直方向的线轮廓图  
Fig. 7 Effective collection efficiency of the system (considering the effects of geometric solid angle and multilayer reflectivity).

(a) General drawing; (b) line profile in the horizontal direction; (c) line profile in the vertical direction

## 5 结 论

系统阐述了基于开放式 Wolter 显微镜构型的亚微米分辨率 X 射线显微镜的设计，详细介绍了显微镜的基本光学结构和设计方法，提出一组适用于 RT 不稳定性诊断的 2.5 keV 亚微米分辨率 X 射线显微镜的设计，采用光线追迹的方法开展了结构参数验证和初步的性能评价。通过采用 Cr/C 周期多层膜，系统的有效视场为 ±0.35 mm。中心视场的分辨率约为 0.63 μm，全视场范围内空间分辨率优于 1 μm。系统的几何集光立体角为  $3.73 \times 10^{-5}$  sr，考虑多层膜反射率的系统响应效率峰值为  $1.52 \times 10^{-5}$  sr，在

±0.46 mm 的范围内大于  $1.74 \times 10^{-6}$  sr。

应当指出的是，在集光效率方面传统封闭式 Wolter 显微镜的几何集光立体角为  $1.94 \times 10^{-3}$  sr。由于开放式构型采用部分镜面进行成像，因此集光立体角相对于原构型有所下降，但仍然优于目前诊断中常用的针孔相机和 KB 显微镜等。通过改善超光滑旋转二次曲面镜的加工工艺，可以进一步增大反射镜的有效镜宽，提升开放式构型的集光效率。

本文进一步拓展了 Wolter 显微镜构型在高精密 X 射线成像诊断中的应用，提出一种大视场、高空间分辨率和高集光效率的 X 射线光学结构和系统，能够有效弥补现有诊断设备在空间分辨率和信噪比等方面的不

足。未来有望在长脉冲驱动的小振幅、高空间频率平面调制靶扰动增长研究中发挥重要作用。此外,高品质的光学元件是 Wolter 显微镜构型的关键。近年来,随着我国超精密光学加工技术突飞猛进的发展,未来一定有更多性能优异的诊断技术和设备得到应用。

## 参 考 文 献

- [1] Jiang S E, Wang F, Ding Y K, et al. Experimental progress of inertial confinement fusion based on ShenGuang III laser facility in China[J]. Nuclear Fusion, 2018, 59(3): 032006.
- [2] Pu Y D, Huang T X, Ge F J, et al. First integrated implosion experiments on the SG-III laser facility[J]. Plasma Physics and Controlled Fusion, 2018, 60(8): 085017.
- [3] Lan K, Dong Y S, Wu J F, et al. First inertial confinement fusion implosion experiment in octahedral spherical hohlraum[J]. Physical Review Letters, 2021, 127(24): 245001.
- [4] 王立锋, 叶文华, 陈竹, 等. 激光聚变内爆流体不稳定性基础问题研究进展[J]. 强激光与粒子束, 2021, 33(1): 012001.  
Wang L F, Ye W H, Chen Z, et al. Review of hydrodynamic instabilities in inertial confinement fusion implosions[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2021, 33(1): 012001.
- [5] 缪文勇, 袁永腾, 丁永坤, 等. 神光 II 装置上辐射驱动瑞利-泰勒不稳定性实验[J]. 强激光与粒子束, 2015, 27(3): 032016.  
Miao W Y, Yuan Y T, Ding Y K, et al. Experiments of radiation-driven Rayleigh-Taylor instability on the Shenguang-II laser facility[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2015, 27(3): 032016.
- [6] 吴俊峰, 缪文勇, 王立锋, 等. 神光 II 装置上间接驱动烧蚀瑞利-泰勒不稳定性实验分析[J]. 强激光与粒子束, 2015, 27(3): 032009.  
Wu J F, Miao W Y, Wang L F, et al. Experimental analysis of indirect-drive ablative Rayleigh-Taylor instability on Shenguang II [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2015, 27(3): 032009.
- [7] Li Y R, Dong J J, Xie Q, et al. Development of a polar-view Kirkpatrick-Baez X-ray microscope for implosion asymmetry studies[J]. Optics Express, 2019, 27(6): 8348-8360.
- [8] Li Y R, Mu B Z, Xie Q, et al. Development of an X-ray eight-image Kirkpatrick-Baez diagnostic system for China's laser fusion facility[J]. Applied Optics, 2017, 56(12): 3311-3318.
- [9] Li W J, Mu B Z, Ren K, et al. Development of a quasi-coaxial dual-energy flat spectral response X-ray imaging instrument for measuring hotspot electron temperature[J]. Optics Express, 2022, 30(6): 8777-8793.
- [10] Yi S Z, Dong J Q, Jiang L, et al. Simultaneous high-resolution X-ray backlighting and self-emission imaging for laser-produced plasma diagnostics using a two-energy multilayer Kirkpatrick-Baez microscope[J]. Matter and Radiation at Extremes, 2021, 7(1): 015902.
- [11] Jiang C L, Xu J, Mu B Z, et al. Four-channel toroidal crystal X-ray imager for laser-produced plasmas[J]. Optics Express, 2021, 29(4): 6133-6146.
- [12] Qing B, Wei M X, Yang G H, et al. A time-gated multi-channel X-ray crystal spectrometer on the Shenguang-III laser facility[J]. Review of Scientific Instruments, 2018, 89(8): 083108.
- [13] 陈伯伦, 杨正华, 李晋, 等. 用于烧蚀过程界面轨迹测量的球面弯晶成像系统[J]. 光学学报, 2022, 42(11): 1134012.  
Chen B L, Yang Z H, Li J, et al. Spherically bent crystal imaging system for interface trajectory measurement during ablation[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(11): 1134012.
- [14] 伊圣振, 司昊轩, 黄秋实, 等. 激光惯性约束聚变 X 射线诊断用多通道 Kirkpatrick-Baez 成像系统研究进展[J]. 光学学报, 2022, 42(11): 1134007.
- [15] Yi S Z, Si H X, Huang Q S, et al. Research progress of multi-channel Kirkpatrick-Baez microscope for X-ray diagnostics in laser inertial confinement fusion[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(11): 1134007.
- [16] 何凯, 缪文勇, 涂绍勇, 等. 靶参数对收缩几何瑞利-泰勒不稳定性诊断的影响[J]. 光学学报, 2017, 37(2): 0214002.  
He K, Miao W Y, Tu S Y, et al. Effects of capsule parameters on diagnosis of convergent geometry Rayleigh-Taylor instability [J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(2): 0214002.
- [17] 朱秀榕, 周斌, 杜艾, 等. ICF 分解实验用双介质调制靶的研制[J]. 强激光与粒子束, 2014, 26(1): 012004.  
Zhu X R, Zhou B, Du A, et al. Fabrication of dual-layer perturbation target for ICF resolved experiments[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2014, 26(1): 012004.
- [18] Wolter H. Spiegelsysteme streifenden einfalls als abbildende optiken für röntgenstrahlen[J]. Annalen Der Physik, 1952, 445(1/2): 94-114.
- [19] Harrison F A, Boggs S, Christensen F E, et al. The nuclear spectroscopic telescope array (NuSTAR) [J]. Astrophysical Journal, 2010, 770(103): 347.
- [20] Dichter B K, Woolf S. Grazing angle proton scattering: effects on Chandra and XMM-Newton X-ray telescopes[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2003, 50(6): 2292-2295.
- [21] Chase R C, Silk J K. Ellipsoid-hyperboloid X-ray imaging instrument for laser-pellet diagnostics[J]. Applied Optics, 1975, 14(9): 2096-2098.
- [22] Remington B A, Haan S W, Glendinning S G, et al. Large growth Rayleigh-Taylor experiments using shaped laser pulses [J]. Physical Review Letters, 1991, 67(23): 3259-3262.
- [23] Fein J R, Ampleford D J, Vogel J K, et al. A Wolter imager on the Z machine to diagnose warm X-ray sources[J]. Review of Scientific Instruments, 2018, 89(10): 10G115.
- [24] Wu M, Kozioziemski B, Vogel J K, et al. Characterization and calibration of a multilayer coated Wolter optic for an imager on the Z-machine at Sandia National Laboratories[J]. Review of Scientific Instruments, 2018, 89(10): 10G114.
- [25] Takeuchi A, Aoki S, Yamamoto K, et al. Full-field X-ray fluorescence imaging microscope with a Wolter mirror[J]. Review of Scientific Instruments, 2000, 71(3): 1279-1285.
- [26] Nousek J A, Garmire G P, Pipetti R J, et al. Diamond-turned lacquer-coated soft X-ray telescope mirrors[J]. Applied Optics, 1988, 27(8): 1430-1432.
- [27] Matsuyama S, Yasuda S, Yamada J, et al. 50-nm-resolution full-field X-ray microscope without chromatic aberration using total-reflection imaging mirrors[J]. Scientific Reports, 2017, 7: 46358.
- [28] Matsuyama S, Yamada J, Kohmura Y, et al. Full-field X-ray fluorescence microscope based on total-reflection advanced Kirkpatrick-Baez mirror optics[J]. Optics Express, 2019, 27(13): 18318-18328.
- [29] Morales R I, Remington B A, Schwinn T. High precision Wolter optic calibration facility[J]. Review of Scientific Instruments, 1995, 66(1): 700-702.
- [30] Yamauchi K, Mimura H, Inagaki K, et al. Figuring with subnanometer-level accuracy by numerically controlled elastic emission machining[J]. Review of Scientific Instruments, 2002, 73(11): 4028-4033.
- [31] Yamamura K, Yamauchi K, Mimura H, et al. Fabrication of elliptical mirror at nanometer-level accuracy for hard X-ray focusing by numerically controlled plasma chemical vaporization machining[J]. Review of Scientific Instruments, 2003, 74(10): 4549-4553.

# Design of Submicron Resolution Wolter Microscope

Li Yaran<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Intelligent Infrared Perception, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

<sup>2</sup>Key Laboratory of Infrared System Detection and Imaging Technology, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China

## Abstract

**Objective** In laser inertial confinement fusion, high-precision X-ray imaging diagnostic instrument has become the key to observing the implosion process and quantitatively inverting the implosion parameters. It plays an important role in the research on irradiation uniformity, implosion compression symmetry, hydrodynamic instability, and fuel mixing. Rayleigh-Taylor (RT) instability during implosion is a non-linear high-gain transient process, which requires high spatial resolution, large effective field of view, and high temporal resolution of the diagnostic system. RT instability experiments are typically performed using plan-modulated samples with low amplitude and high spatial frequency sine periods. Higher spatial resolution helps reveal early phenomena of hydrodynamic instability. Currently, diagnostic X-ray imaging equipment widely used in diagnostic science mainly includes pinhole camera, Kirkpatrick-Baez (KB) microscope, Wolter microscope, and spherically bent crystal. Affected by initial configuration and optical processing capabilities, the optimum spatial resolution is 3–5  $\mu\text{m}$ , and the effective field of view is limited to the order of hundreds of microns to millimeters. Improving the spatial resolution of diagnostic equipment at the submicron level is favorable for revealing the phenomena and detailed features that are difficult to observe in implosion diagnostics. In particular, it may enhance the ability to observe low amplitude and high spatial frequency sine samples in the study of RT instability. Wolter microscope is an ideal optical configuration for high-precision X-ray imaging diagnostics due to its high spatial resolution and high optical collection efficiency. However, it is difficult to directly apply the Wolter configuration to laser fusion research. Most of the previous development experience focused on the development of full-aperture Wolter mirrors and imaging systems. It is difficult to obtain the theoretically designed ultra-high spatial resolution since small aperture and closed quadric mirror are hard to be processed. Errors in the form and roughness of the mirror surface directly influence the performance of the Wolter configuration.

**Methods** A submicron resolution X-ray microscope is designed for high-precision RT instability diagnostics. By improving the Wolter configuration, this paper transforms the closed inner surface that could not be directly processed and tested into an open outer surface that could be directly processed and tested by using part of the sector. The improved Wolter configuration is a double mirror structure based on a rotating hyperboloid mirror and a rotating ellipsoid mirror. It still has the technical features of the original Wolter configuration and can meet the technological requirements of high-precision optical treatment, inspection, and coating. A Wolter microscope system with large grazing angle and high magnification is designed. The main structural parameters of the system, such as object distance, grazing angle, magnification, and mirror size, are optimized by theoretical derivation and ray-tracing simulation. A large grazing angle and high reflectivity at the specific energy point can be achieved by coating periodic Cr/C multilayer films on the mirror surface. The ray-tracing simulation verifies the optical structural parameters and evaluates the imaging performance of the system.

**Results and Discussions** The design and verification of a 2.5 keV submicron resolution modified Wolter microscope has been completed. The system working energy point is designed as 2.5 keV with a grazing angle of  $2.0^\circ$ , and the system magnification factor is  $35\times$ . Limited by the angular bandwidth of the multilayer films, the effective field of view is about  $\pm 0.35$  mm. At the current technical levels, the mirror slope error is 1  $\mu\text{rad}$ , surface shape accuracy is  $\lambda/43$ , and the roughness is 0.3 nm. In this condition, the resolution of the central field of view is about 0.63  $\mu\text{m}$ , and the spatial resolution over the full field of view is better than 1  $\mu\text{m}$ , which satisfies the designed submicron resolution. At the same time, if the accuracy of the surface shape increases to  $\lambda/85$ , the system can achieve imaging ability near the diffraction limit. The system is characterized by high collection efficiency and the geometric solid angle is  $3.73\times 10^{-5}$  sr, without considering the reflectivity of multilayer films. While considering it, the response efficiency of the system reaches a peak of  $1.52\times 10^{-5}$  sr and is greater than  $7.55\times 10^{-6}$  sr in the field of  $\pm 0.28$  mm.

**Conclusions** The design of a submicron resolution X-ray microscope based on an open Wolter configuration is systematically described. The optical structure, design methodology, and performance characteristics of the microscope are presented in detail. A set of 2.5 keV submicron X-ray microscope parameters for RT instability diagnostics is



provided. At the same time, it is pointed out that since the open configuration uses a portion of the mirror for imaging, the solid angle is smaller than that of the original configuration, but it is still larger than that of the pinhole camera and KB microscope commonly used in diagnostics. With the improvement in the super smooth rotary quadric mirror processing technology and a further increase in the effective mirror width, the geometric solid angle of the microscope can be greatly raised. This study extends the application of the Wolter configuration to high-precision radiographic imaging diagnostics. An X-ray optical configuration with a large field of view, high spatial resolution, and high collection efficiency is provided, which can effectively compensate for the shortcomings of existing diagnostic equipment. In the future, it is expected to play an important role in studying the growth of disturbance in low amplitude and high spatial frequency planetary modulated targets driven by long laser pulses.

**Key words** X-ray optics; inertial confinement fusion; plasma diagnostics; Rayleigh-Taylor instabilities; Wolter; multilayer films