

文章编号: 0258-7025(2001)04-0359-03

用于 ICF 实验的轴对称掠入射软 X 射线 显微镜中的光学系统

郭培基 高清峰 董玉芝

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 长春 130022)

提要 简单叙述了几种可用于 ICF 实验研究的掠入射软 X 射线显微镜的主镜结构, 详细介绍了 Wolter I 型轴对称掠入射软 X 射线显微镜的成像原理、系统的主镜参数以及系统中用到的观察瞄准系统的光学方案。

关键词 光学系统, 掠入射显微镜, 软 X 射线

中图分类号 TH 742.63 文献标识码 A

Optical System of the Grazing Incidence Soft X-ray Microscope for ICF

GUO Pei-ji GAO Qing-feng DONG Yu-zhi

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics, Physics,
The Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022)

Abstract X-ray images system is a important equipment in ICF experiment. After brief survey some kinds of grazing incidence X-ray microscope used for ICF, the principles of Wolter I X-ray microscope, and the optical system of grazing incidence soft X-ray microscope used for ICF are given.

Key words optical system, grazing incidence microscope, soft X-ray

1 引言

在惯性约束聚变实验研究中, X 光空间成像测量是一项重要的诊断内容, 可是 X 光的特性决定了人们不能象电子和离子那样利用电磁场来使它偏转和聚束, 同时也不能象可见光那样制造由普通光学玻璃透镜组成的折射式的光学系统来使其会聚。X 光成像方法可大致归结为两类, 一类是透射式成像, 以针孔成像和编码孔径成像为代表; 另一类是反射式成像, 以各种掠入射软 X 射线显微镜和基于 X 射线多膜技术的 X 射线正入射显微镜为代表。旋转对称掠入射软 X 射线显微镜以其分辨率高、视场大、聚光能力强而倍受重视。但由于其加工和检测非常困难, 到目前为止, 只有几个国家研制出这种系统。由于我国科学技术发展的需要, 在中国工程物理研究院二所的参与及支持下, 我们研制出了旋转轴对称掠入射软 X 射线显微镜系统, 它由 X 光成像系统(主反射镜系统)和观察瞄准系统组成。

2 显微镜的主反射镜系统

用于 ICF 实验研究的掠入射反射式的软 X 射线显微镜主反射镜系统主要有三种结构模式, 一种是 1948 年由 Kirkpatrick 和 Baze 首创的 KB 型结构, 他们用两块正交圆柱面镜掠入射反射, 首次得到两维聚焦的 X 射线像(图 1(a))。另一种是 Wolter 于 1952 年研究出的旋转轴对称掠入射反射系统, 有几种型号, 其中 Wolter I 型由旋转对称双曲面和椭球面组成(图 1(b))。第三种又有两种类型, 一种是 1989 年 R. Kodama 等提出的结构模式, 他们称它为先进的 KB 系统, 由两块正交双曲面和两块正交椭球面共四块反射镜组成(图 1(c))。另一种是 R. Sauneuf 等提出的被称为改进的 KB 型显微镜系统 KBA(图 1(d)), 它由四块正交球面反射镜构成。

Wolter I 型旋转对称掠入射软 X 射线显微镜的光路如图 2 所示。双曲面与椭球面有共同的焦点 F1H 和 F1E, 双曲面的第二个焦点(F2H)处是显微镜的物平面, X 射线从双曲面的第二个焦点出发, 经双曲面反射后, 在双曲面和椭球面的共同焦点处(F1H

和 F1E)形成物体放大的虚像,这个虚像经椭球面反射镜,在其第二个焦点处(F2E)形成物体的放大的实像。Wolter 的这个设计理论上是完善的,轴上点

不产生任何像差,但轴外点是有像差的,且随着视场扩大,其轴外点像差也增大,即空间分辨率随视场增大而逐渐降低。

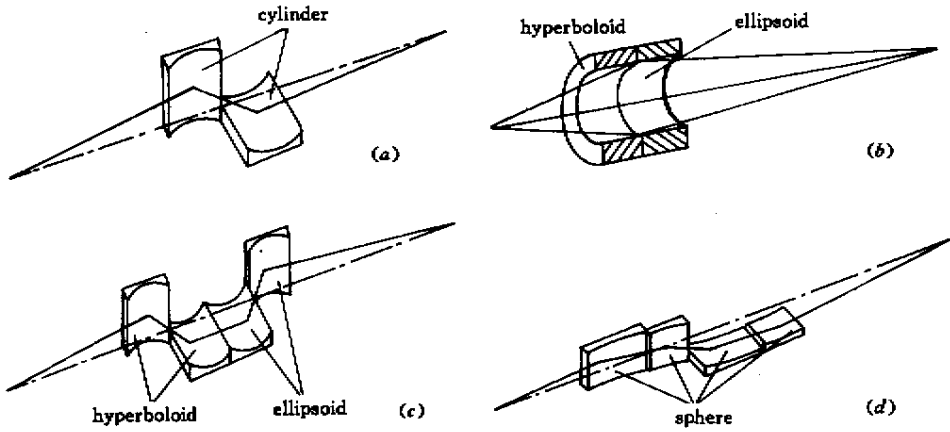


图 1 KB(a), Wolter I(b), AKB(c)和 KBA(d)型显微镜
Fig.1 KB(a), Wolter I(b), AKB(c) and KBA(d) microscope

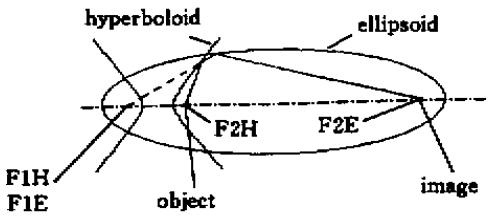


图 2 Wolter I 型 X 射线显微镜的原理
Fig.2 Principles of Wolter I X-ray microscope

虽然 Wolter 型 X 光显微镜在理论上是完善的,但由于使用轴对称旋转非球面,这就导致了加工及检测的困难。Wolter 于本世纪 50 年代初设计了这种结构,并进行了详细的分析和公式推导,直到 70 年代末,由于超光滑表面制造及检测技术的发展,才制造出第一台可用的系统,而且是美国的劳伦斯·里弗莫尔实验室和英国国家物理实验室联合研制的。

我们研制轴对称掠入射软 X 射线显微镜中的主反射镜系统(X 光成像系统)就是 Wolter I 型的旋转轴对称掠入射软 X 射线显微镜,其工作的能量范围为 0.1 keV ~ 1 keV,即显微镜的工作波长为 12.4 ~ 1.24 nm。对于这个工作波段的反射表面,掠入射角在 1°左右时反射率高些,我们选用的是 1.2°。物距的选择必须考虑工作时碎片对反射镜的污染、仪器设备的总体结构尺寸等因素。物距小,工作时

碎片对反射镜的污染危险大,物距大,在同样的放大倍率下仪器设备的总体结构尺寸就长,综合各种因素现选用物距为 230 mm。由于场地的限制,选定放大倍率为 15。考虑加工、装调等因素,系统的最大聚光立体角为 1×10^4 Sr。根据使用要求,系统的视场要大于 200 μm ,系统的分辨率要优于 5 μm 。根据这些选定和要求的主要技术参数,系统主镜的设计结果为:双曲面反射镜长轴半径为 151.67 mm 左右,短轴半径为 7.08 mm 左右,椭球面反射镜长轴半径为 1952.83 mm 左右,短轴半径为 27.34 mm 左右,物方数值孔径为 0.08 左右,系统的总光学长度为 3650 mm。

3 观察瞄准系统

观察瞄准系统的功能是保证 X 光成像系统能准确地瞄准目标靶,并保证目标清晰地成像在记录介质上。

观察瞄准系统由照明系统、成像系统及两个观察系统组成,该系统的光轴和 X 光成像系统一致。成像系统通常用共轭距与 X 光成像系统共轭距相等的显微物镜系统,这使得装调非常麻烦,并且由于共轭距及装调时的误差,常常出现瞄准时成像清晰而实际成像不清晰的现象,现由于采用新的照明光源和照明方案,成像系统就直接用 X 光成像系统。

3.1 照明系统

照明系统(图 3)的照明光源是高亮度的汞灯光,从光源箱出来的光经光纤传到靶室的一窗口附近经过 0.4 倍左右的物镜系统耦合进靶室内的光纤,光纤里出射的光再经过逆向用的显微物镜系统聚焦照明目标靶。这个聚焦物镜的像方数值孔径应大于主镜系统的物方数值孔径,但不能太大,否则能量损失太多,影响后面的观察。在靶室外面可以用操纵杆调节靶室内的显微物镜系统以使照明系统的光轴和 X 光成像系统的光轴一致以及照明光斑聚焦在目标靶上。

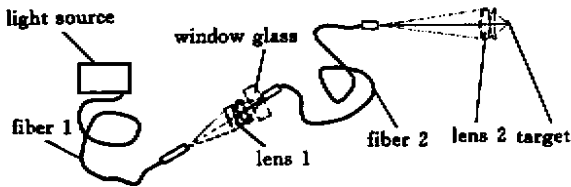


图 3 照明系统

Fig.3 Light system

3.2 观察系统

观察系统(图 4)有两个,观察系统 1 由分光镜、密封窗、分划板、转像镜和目镜组成,被照明的目标靶经过掠入射反射成像系统和分光镜、密封窗成像在分划板上,通过这个观察系统可观察目标靶成像的位置以及所成像的质量,从而指导对主镜的调整。

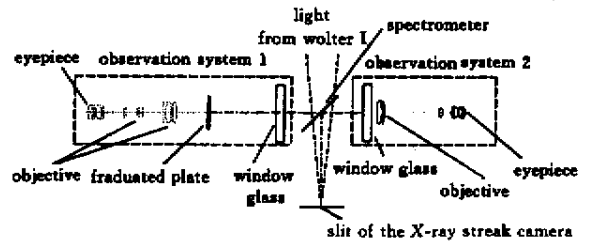


图 4 观察系统

Fig.4 Observation system

观察系统 2 由分光镜、密封窗、转像镜和目镜组成,通过这个系统能观察到接收目标靶 X 光像的条纹相机的阴极狭缝,由此获知掠入射成像系统是否把目标靶成像在条纹相机的阴极狭缝上,同观察系统 1 一样也用于指导对主镜的调整。

两个观察系统的目镜和相应的 CCD 相机被设计成是直接可换的,当用 CCD 相机时能在操纵台的监视器上直接观察。

参 考 文 献

- 1 R. Kodama, N. Ikeda, Y. Kato *et al.*. Development of a Kirkpatrick-Baez microscope with a large field. *SPIE*, 1995, **2523**:165 ~ 173
- 2 R. Sauneuf, Jean-Michel Dalmasso, Thierry Jalinaud *et al.*. Large-field high-resolution x-ray microscope for studying laser plasmas. *Rev. Sci. Instrum.*, 1997, **68**(9) 3412 ~ 3420