

长春光机所软X射线成像望远镜和同步辐射光束线研制技术的发展现状

邵 景 鸿

摘要: 本文概述了我所12年(1978~1990)来在软X射线成像望远镜和同步辐射光束线以及短波段光学中有关单元技术研究的发展现状。指出了限制软X射线光学技术发展的主要问题, 提出发展软X射线成像和同步辐射反射光学技术应开展的主要研究工作。

一、引 言

随着空间天文学的发展, 高灵敏度、高空间分辨率、高时间分辨率的软X射线成像望远镜(以下简称XRT)已成为X射线天文学研究中的主要观测设备。由于空间环境和能反映被观测目标活动特征的辐射波段(如太阳日冕各特征区的辐射波段范围为几个 \AA 到几十个 \AA)以及这些被观测目标在时间和能量等物理参量变化的宽阔的动态范围等特殊条件的出现, 对XRT的研制提出了许多难以解决的问题, 如保证仪器焦平面只允许在几十个微米范围内变化的高度热稳定的机械结构、保证在掠入射条件下得到高分辨率图像的大集光面积、高反射效率的超光滑表面的掠入射反射镜以及为保证获取各观测目标不同光谱特性的各种高透过、无针孔的金属、有机膜带通滤光片和低噪声灵敏度成像探测系统等都需要一些特殊材料、元器件和专门的工艺、测试技术才能解决。美国为适应X射线天文学的发展, 从1960年早期的火箭运载的低空间分辨小望远镜开始到天空实验室阿波罗望远镜装置上的高分辨率XRT研制成功(1973年)前后总共用了将近14年。西德从1973年开始第一台分辨率为弧分级铝合金结构XRT研制成功将近六年的时间。

为了填补我国在空间天文学领域里的空白, 中国科学院于1978年决定研制我国一号天文卫星并由我所进行星载软X射线望远镜的工程研制工作。于1983年6月完成了第一台可见光图像分辨率为1弧分的星载实验样机。

八十年代, 随着我国同步辐射(以下简称SR)装置的建立, 我所的短波光学技术又开始进入了一个新的发展阶段。我们首先完成了1米正入射真空紫外单色仪和壁稳氩弧光源, 并随即开展了用于激光等离子体诊断的掠入射凹面光栅摄谱仪和配合SR应用研究的光束线单色仪的工程研制。

为适应国内有关单位在短波段光学领域里研究工作的发展, 近年又完成了基本上可复盖整个短波段范围(8nm~200nm)的光谱光源系列。

二、软X射线成像望远镜

早在1952年西德科学家Wolter就建立了完善的掠入射X射线成像系统(如图1所示)。

这是一种两个非球面回转体同轴共焦系统，它克服掉了单个非球面回转体反射镜下不能满足 Abbe 正弦条件，从而引起轴外成像存在严重彗差的缺陷。但由于受当时工艺水平、制造技术以及运载工具的限制，一直到1957年人造地球卫星上天后，这种掠入射成像系统在X射线天文观测和研究中才得以广泛应用。

从七十年代开始，美国、西德、日本、荷兰都相继设计并研制出高空间分辨率的 XRT，并分别安放在卫星和空间站上。这些望远镜的集光面积由开始的十几 cm^2 到上百 cm^2 ，空间分辨率已达 2 弧秒。为实现远空间目标的观测，美国从八十年代初开始研制 6 层套叠的大型 X 射线轨道望远镜 (AXAF)，其口径已大到 1.2m，焦距 10m，集光面积为 1 000 cm^2 ，空间分辨率提高 1 弧秒，预计九十年代初发射。

我所于1979年开始星载 XRT 的研制，采用国外已成熟的 Wolter-I 型掠入射成像系统作为主光学系统（如图 2 所示），用由镍网支持的铝合金膜和镀有该合金膜的聚乙烯有机膜分别作为光学系统的前置滤光片和焦平面前的主滤光片来获取系统的有效工作波段（ $10 \text{ \AA} \sim 60 \text{ \AA}$ ）。在焦平面上用微通道板(MCP)进行光电转换，用光学耦合的方法将 MCP 荧光屏上的可见光图像通过 SEC 管的光纤面耦合到光阴极上并聚焦于靶面。最后

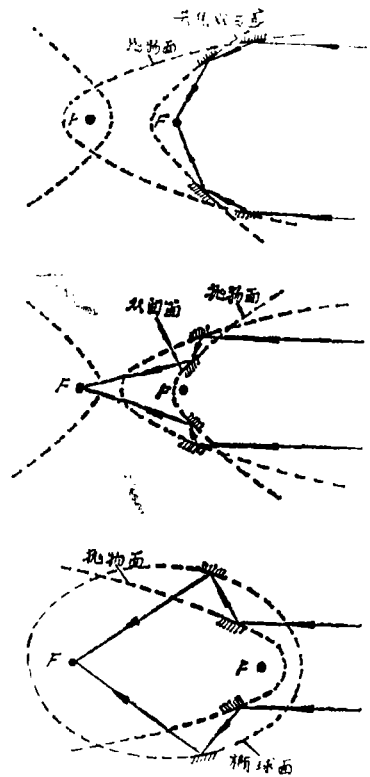


图1 Wolter 建议的三种 X 射线望远镜的掠入射成像系统
(图(上)为 I 型；(中)为 II 型；(下)为 III 型)

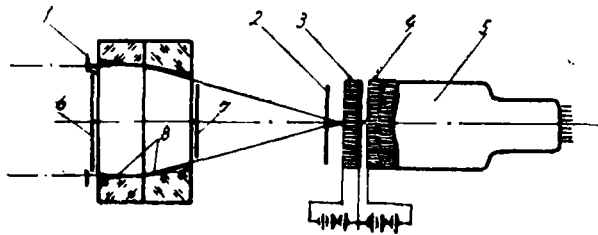


图 2 软 X 射线望远镜光学系统原理图

图中1-前置滤光片；2-主滤光片；3-微通道板；4-光纤荧光屏；5-慢扫描二次电子电导摄像管；6-光栏1；7-光栏2；8-望远镜物镜

由慢扫描电视摄像和图像编码系统将太阳图像传输到地面（系统工作原理如图 3 所示）

按总体考虑，我们开展了结构总体、Wolter-I 型成像光学系统设计、反射镜面形及超光滑表面的光学与机械超精细加工工艺、精密测量及望远镜总体性能检测等课题的研究、以及 X 射线光源、金属膜和有机膜滤光片、探测器、慢扫描二次电子电导摄像管 (SEC)、贮存管和积累电视等研制工作。1983年 6 月，完成了包括力学、声学、温控等环膜试验和可见光联调试验。当时的物镜光学空间分辨率已达到 20 弧秒（见图 4），电视图像空间分辨率已接近 1 弧分。

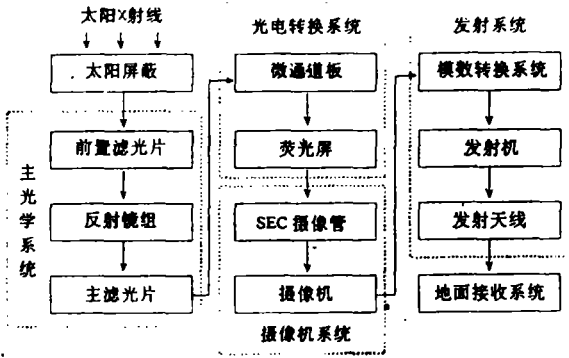
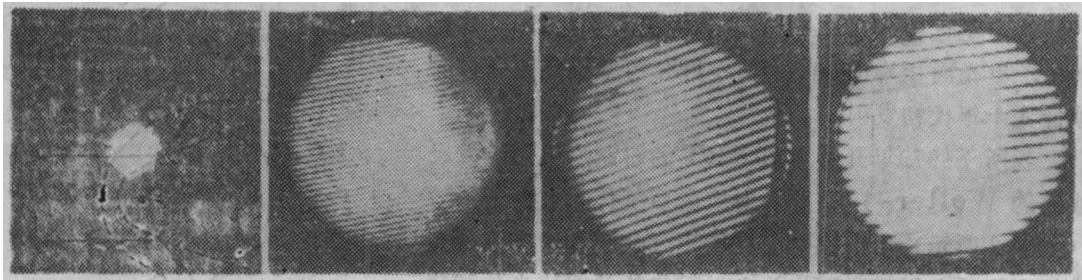


图3 软X射线望远镜工作原理框图



(a) (b) (c) (d)

图4 用于可见光联调试验的反射镜（物镜）单元的星点和光学鉴别率板图像

图(a)为0.1星点像，图形较规矩，但光斑弥散较大，抛物与双曲反射镜8个螺钉连接处呈现8个条状辐射，说明面形对镜体内部应力反应是极其灵敏的。(b)(c)(d)分别为20、30、40弧秒的光学鉴别率板图像，条纹清晰，但像面对比度较差。

这个结果同当时美国阿波罗望远镜装置上的真空紫外望远镜（电视传输图像）水平相当。

三、SR 光束线

SR具有许多优异特性，它应用范围相当广泛。如表面研究、X光形貌术、广延X射线吸收精细结构（EXAFS）、X光衍射和小角散射、X光显微术、X射线光刻等。但这些研究所需要的波长及所利用的SR的特性各不相同。为此必须在加速器或贮存环上建造满足各种应用所需的光束线。因此，大部分光束线都设有真空紫外和软X射单色仪系统，在单色仪系统前后尚需配置不同类型的滤波、聚光、聚焦、准直等光学元件及系统。

光束线的建造除了满足一般光学（如波长的选择）要求以外，还必须首先解决以下三个主要问题：

1. 光束线必须具有适应超高真空环境的能力。由于光束线与电子贮存环上的光束线前端区直接连接，为保证电子在超高真空贮存环内正常运行，光束线在于前端区连接的区域内也必须保持超高真空并有适当的安全保护措施，以防光束线由于意外事故而破坏电子贮存环的超高真空环境。

2. 光束线必须具有防止由于强热辐射引起光学元件热畸变的能力。由于SR的辐射强度比普通X射线光源强2~3个数量级。直接照射光学元件上（尤其是束线前置镜）的辐射功

率少至几百瓦，最大可达上千瓦，因此对某些决定系统光学分辨率（或光斑质量等）的关键光学元件必须合理的选择材料和采取必要的水冷措施，防止元件热畸变对光学系统性能的破坏。

3. 光束线必须具有最大限度传输辐射的能力。由于SR在束线中都是掠入射传输，为保证系统获得最高的传输能力，除了合理的光学设计外，必须严格保证光学元件的超光滑表面质量和合理的滤波系统。

此外，还应满足实验站对输出辐射的特有要求。如光刻束线供给光刻的光斑必须具有最佳的均匀性。这一特殊要求，对X射光刻曝光恰恰是最重要指标之一。

我所在八十年代中期先后为合肥和北京两个SR实验区进行部分光束线的研制工作。到目前为止，我们分别完成了荧光时间寿命光束线及其单色仪系统、软X射线光刻光束以及两个实验区所需的各种超光滑表面反射镜和光栅镜坯等光学元件的研制和加工任务。我们为北京SR实验区研制的软X射线光刻光束线以合理的光学、物理、工程设计及优异的研制质量已于1990年7月10日正式通过了国家验收。在验收之前于6月8日在该束线上成功地进行了我国首次SR光刻曝光实验。当时贮存环正在进行对撞实验，束流仅有8mA，但仍然得到了分辨率为 $0.5\sim 1\mu\text{m}$ 的反差优良、清晰的线条。曝光效率同一般X射线光源相比提高了将近20倍。

我所在为SR应用研究开展的光束线、单色仪等一系列研制工作中也形成了一个相对稳定的基础。现在，我们已经建立了不同类型单色仪光学系统的设计程序，并且奠定了相应的超高真空技术基础。但要进一步在我所发展SR光学及其工艺技术，尚需进行以下各方面的研究与开展工作：

(1) 在光束线设计方面，应开展最佳光学面型的选择设计，系统像差控制等课题的研究。如像差控制中，由于单色仪的分辨率和辐射流量的输出与入射狭缝宽度的变化是矛盾的。如果既保证高分辨率而又获得高流量的输出，则必须增大会聚立体角。这样，自然带来大的像差影响，同时单色仪势必要有一个大的接收光栅。为了解决这个问题，必须采用相应的光学元件进行像差控制，如超环面镜或在水平和垂直两个方向分别聚光的球面镜。后一种方法同环面镜相比的最大优点是两个方向的放大倍率可分别选择，由于是球面而容易降低像差的影响。

多层膜反射镜的研究是当前国际上在短波光学领域里的一个热点。由于它的结构简单和基于干涉原理的良好单色性能，将来在SR反射光学中，大有代替单色仪系统中昂贵的光栅元件的趋势。目前，我们正在为北京SR实验室研制一套用我们自制的多层膜反射元件作单色器的多层膜光学性能检测仪就是一个应用尝试。该设备将装在光刻束线高真空管道区，距光源25米处。

这种多层膜反射元件随着它的制备技术日趋成熟，将来在软X射线望远镜中可以代替目前造价高的Wolter-I型反射镜而成为新一代的软X射线光学成像系统。近年来，国外已开始着手这方面的应用研究。

(2) 反射镜和镀层材料方面，应进一步开展抛光性能、材料的化学、机械尺寸稳定性、抗X射线损伤能力、真空适应能力、反射率和可清洗性等课题的研究。

我所对铝合金(LD₂和LF₉)和镍磷合金镀层材料显微结构、稳定性和镀层的牢固性都进行了较深入的实验研究。镍磷合金镀层厚度在保证牢固性的基础上已达到0.1mm，但对可作为SR反射元件衬底的其它材料，如铍、镍及其合金、无氧铜、SiC等，以及用于不同

波段的镀层材料的附着性、镀层的最佳厚度等尚需进行实验研究，从而进一步确立反射镜和镀层材料的选择原则。

(3) 加工、成形和抛光方面主要应集中在椭球面、抛物面和超环面三种非球面反射镜的成形和抛光工艺的研究。这里面包括常规的精细抛光和钻石车削、离子刻蚀、复制技术以及多层膜涂镀技术等。

此外，在质量评价，特性表征，以及在线（光束线）监测等方面也需开展的相应的研究。如面形、像差测量、粗糙度和散射光测量。在线监测方面如真空环境污染，光学性能退化和X射线损伤等。

**Present Situation of the Research and Development
for Soft X-ray Imaging Telescopes and the Beam
Line for Synchrotron Radiation at Changchun
Institute of Optics and Fine Mechanics**

Shao Jinghong

Abstract

In this paper summarized that present developmental situation of the research and development for soft X-ray imaging telescope and the beamline for synchrotron radiation as well as other unit technics concerned in short wave-band optics through 12(1978—1990) years at our institute. Pointed-out that principal problems of soft X-ray optics technic' development are limited, and presented principal aspect research works are should developed about developing technics of soft X-ray imaging and reflecting optics for synchrotron radiation.