

# X 射线正入射显微镜及其在 ICF 中的应用\*

王占山 陈星旦

(中国科学院长春光学精密机械研究所 长春 130022)

**摘要** 全面叙述了 X 射线正入射显微镜的发展,探讨了影响正入射显微镜性能的关键技术问题,指出了其在等离子体诊断中的应用。

**关键词** X 射线正入射显微镜 多层膜 超光滑表面 滤光片 分辨率

## 1 引 言

任何物质对 X 射线的折射率接近于 1 且有吸收,其折射和非掠入射反射能力极差,无法制成折射型透镜和非掠入射反射镜。为此,在 X 射线波段必须采用特殊的光学元件,多层膜是这类元件中的重要一种,它可大幅度提高非掠入射条件下镜子对 X 射线的反射率,用它可发展成类似于可见光波段的光学仪器如望远镜、显微镜、投影光刻系统及各类光谱仪器。

X 射线多层膜的早期设想起源于本世纪初 X 射线衍射的发现和 X 射线晶体 Bragg 衍射的应用。天然晶体晶格常数在亚 nm 量级,适于 1nm 以下的 X 射线,为了向长波方向拓展,人们自然想到利用人工办法制备周期厚度为 nm 量级的层状结构,以作为 Bragg 衍射元件。然而到本世纪六十年代为止的相当长时间里,局限于人们对多层膜理论的认识和微结构制备的水平,多层膜研究进展缓慢。进入七十年代,天体物理学、等离子体物理以及同步辐射的飞速发展迫切需要研制 X 射线波段的非掠入射元件,而纳米级制备技术的发展则使研制 X 射线多层膜成为可能。世界上许多大公司、大实验室以及大学都参与到多层膜的研究中,极大地推动了多层膜理论及技术的提高。目前,Mo/Si 被认为是 13~20nm 波段最好的材料对,美国 Livermore 实验室制备的 Mo/Si 多层膜在 13.4nm 处正入射反射率达 66%<sup>[1]</sup>,Mo/Be 多层膜 11.3nm 的正入射反射率达 68.7%<sup>[2]</sup>,这是所有 X 射线多层膜中反射率最高的。此外,Ru/B<sub>4</sub>C 多层膜在 7nm 附近正入射反射率达 20%<sup>[3]</sup>,Mo/Y 多层膜在 8.1nm 和 11.4nm 处的反射率分别达 22% 和 46%<sup>[4,5]</sup>,Fe/C, Cr/C, Ni/C 等多层膜反射率在 4.5nm 处达 10%左右<sup>[6]</sup>,W/B<sub>4</sub>C 多层膜在

\* 本工作得到国家自然科学基金重点项目资助

收稿日期:1998-06-04

修稿日期:1998-07-10

3. 4~5. 0nm 波段正入射反射率达 2%<sup>[7]</sup>, W/Sc 多层膜在 3. 1~3. 2nm 波段正入射反射率达 3. 3%<sup>[8]</sup>, Cr/Sc 多层膜在 3. 14nm 处掠入射角为 72 时, 反射率达 10%<sup>[9]</sup>。这些结果表明: 多层膜在 4. 5nm 以上尤其是 13nm 以上波段已从单纯的实验研究过渡到实际应用。利用多层膜进行 X 射线成像实验最先用单块镜子完成的, 分辨率为  $100\mu\text{m}$ <sup>[10]</sup>, 其后人们逐步开展了两块多层膜反射镜组成的 Schwarzschild 结构的成像实验<sup>[11~13]</sup>。但由于组成 Schwarzschild 系统的两个球面的超精密加工、多层膜制备水平和整个系统装校精度等因素的限制, 人们在很长一段时间内都没有获得衍射极限下的系统分辨率。

目前, Schwarzschild 系统分别沿着几个不同的方向向前发展, 第一是发展 X 射线扫描显微镜<sup>[14, 15]</sup>, 其最重要的是轴上物点的分辨率, 现已达到  $0. 1\mu\text{m}$  以下。第二是用 Schwarzschild 系统发展缩小投影光刻系统<sup>[16, 17]</sup>, 目前最高水平是在  $\phi 0. 4\text{mm}$  的范围内得到  $0. 1\mu\text{m}$  的分辨率。在这种系统中, 除分辨率外, 视场的大小也是极其重要的。第三是发展类似于可见光显微镜的 X 射线显微镜, 用它来产生一个物体的放大像。物体可以是自身发光的<sup>[18~20]</sup>, 也可以是用其它光源照明的, 照明光源有同步辐射<sup>[21]</sup>, X 光管<sup>[22]</sup>, X 射线激光<sup>[23]</sup> 及激光等离子体<sup>[24, 25]</sup>。在 X 射线正入射显微镜工作方式下, 除分辨率外, 观察视场、有效聚光面积及工作距离都是重要的参数, 对不同应用要全面衡量这几个参数, 使显微镜性能达到最佳。

我们在 X 射线多层膜研制的基础上, 率先在国内开展了 X 射线正入射显微镜实验研究, 本文第二部分将结合我们的工作实践阐述 X 射线正入射显微镜关键的技术问题, 第三部分结合 ICF(惯性约束核聚变) X 射线显微成像的需要, 叙述几个典型的应用, 最后我们对今后的工作提出展望。

## 2 X 射线正入射显微镜关键技术

图 1 是我们建立的 X 射线正入射显微镜。光源为激光等离子体, 聚光镜是近正入射多层膜反射镜, 它将激光等离子体发出的 X 射线会聚到显微镜的物面上, 在显微镜物面上  $\phi 200\mu\text{m}$  的范围内产生较均匀的照明。用聚光镜可有效地利用激光等离子体发出的 X 射线, 减少成像时间。显微镜的核心是 Schwarzschild 物镜, 它是由两块近同心的球面反射镜组成, 通过合理

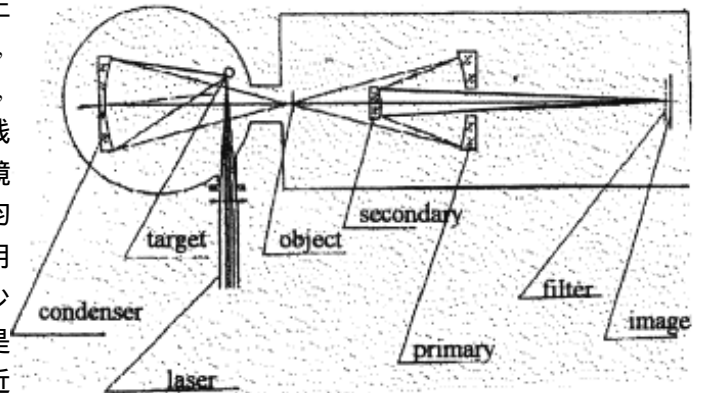


Fig. 1 Scheme of normal-incidence x-ray microscope

选择结构参数, 可使 Schwarzschild 物镜校正三级像差, 提高成像质量。显微镜的实现关键是多层膜, 要在指定的 X 射线波长处镀制高反射率的多层膜并且实现带宽极窄的两块多层膜间的带宽匹配是极其困难。要使 Schwarzschild 物镜成像接近衍射极限, 其波差应小于  $0. 071\lambda$  ( $\lambda$  为系统的工作波长)。若  $\lambda = 10\text{nm}$ , 则系统的波差为  $0. 7\text{nm}$ , 这样的波差分配到两个反射镜面上的面形误差都在亚纳米量级, 而面形精度达亚纳米的光学镜面加工与检测极为不易。要使系统波差最终达到亚纳米水平, 光学装配过程中不应带入任何应力, 这种完全无应力安装也是难以达

到的。显微镜一般是用胶片接收的,也有用光探测器接受的。探测器的分辨率也对系统的分辨率有影响,一般是让系统的分辨率略小于探测器的分辨率。实验中我们采用的 X 光胶片分辨率在  $5\mu\text{m}$  左右,要使系统的极限分辨率有效地得到利用,显微镜的放大率要达到一定值,随着系统放大率的提高,系统的视场变小,像差影响加大,所以要在全面评价显微镜各方面指标的基础上,根据不同的应用目的,设计显微物镜的结构。

一般显微镜采用的光源含有各种波长的光,多层膜除有效地反射所需要的 X 射线外,还对紫外、可见光有很强的反射,而探测器也难以做到只对所需的 X 射线有响应,所以在 X 射线正入射显微镜中要使用滤光片。它很薄,容易损坏。

我们已完成的显微镜的工作波长是  $18.2\text{nm}$ 、放大率  $10.5\times$ 、工作距离为  $381\text{mm}$ ,最后的成像是用铜栅网完成的,铜栅网最细的线条是  $6\mu\text{m}$ 。从获得的图像(图 2)中可清晰地看出此线条,说明我们研制成功的正入射显微镜的分辨率在  $6\mu\text{m}$  以下。

综上所述,在 X 射线正入射显微镜研制过程中必须解决的关键问题有超光滑表面加工及测试,带宽匹配良好的高反射率多层膜制备,光学元件无应力装配,显微镜调整和滤光片制备。

### 3 X 射线正入射显微镜的应用

应用目的不同,决定着显微镜的性能指标。观察自身不发光物体的 X 射线正入射显微镜追求的目标是尽可能提高分辨率。到目前为止,人们已可以获得超过光学显微镜极限分辨率的  $0.2\mu\text{m}$  分辨率,但视场不大,只有几微米。要想在大视场上(如  $\Phi 1\text{mm}$ )成像,分辨率一般在微米水平。我们在此只讨论 X 射线正入射显微镜在 ICF 中的应用。

X 射线正入射显微镜用来研究等离子体的加热、膨胀过程,和条纹相机或分幅相机联合使用,可观察到等离子体的时间演变过程,这对于 ICF 的研究具有特别重要的意义。

1986 年,法国科学家<sup>[18]</sup>率先使用 X 射线正入射显微镜来研究激光加热靶过程中的预加热问题。在 ICF 过程中,靶内能量的沉积和传输对于确定核燃料能达到的压缩程度具有重要的意义。靶内能量传输的特殊机制如过热电子和辐射传导引起的预加

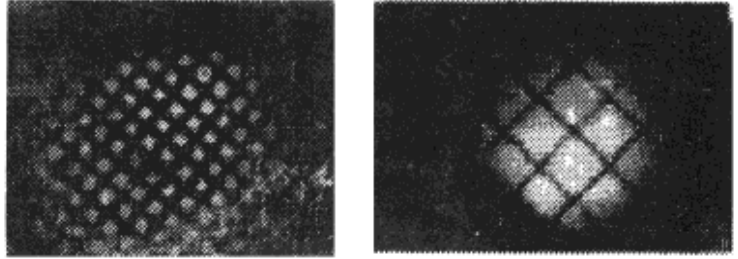


Fig. 2 Soft x-ray micrograph of meshes taken with the schwerschild microscope

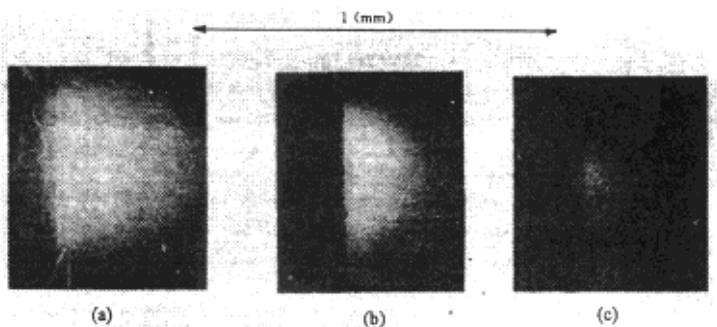


Fig. 3 Image of a coronal plasma on aluminium (the laser comes by the right) respectively for 300(a), 10(b), and 1(c) laser shots

热过程将极大地降低核燃料所能达到的压缩程度。法国科学家想用 X 射线正入射显微镜观测高强度激光辐照到  $20\mu\text{m}$  铝膜和金膜后,由薄膜背后发出的软 X 射线图像。这些背向辐射是由于激光打靶产生的辐射通过相对冷的稠密区时发生碰撞过程,强度衰减很快,吸收大量光子后会使得薄膜背部温度和电离度增大,所以在这一区域,吸收的光子将在宽的光谱范围内产生较长波长的 X 射线辐射。这些辐射可了解到激光等离子体预加热的物理过程。他们计划对 80eV、40eV、10eV 的 X 射线进行观察。文献报道的 X 射线正入射显微镜的工作波长 30.4nm (40eV)、数值孔径 0.2、放大倍数 11.6 $\times$ 、工作距离 127mm。分辨率测量表明此显微镜的分辨率达  $6\mu\text{m}$ 。文献的结果是他们用显微镜观测了小激光脉冲(脉宽 1ns,工作波长 0.53nm,能量 0.5J)会聚打在平面铝靶的 X 射线辐射,图 3 是与激光成直角方向观察到的不同打靶脉冲次数的 X 射线图像。由此他们认为该显微镜适于观察高强度激光打在薄膜靶上,由薄膜背后发出的 X 射线图像,由此图像可以研究激光等离子体中的预加热过程,可惜我们没有看到进一步的实验报道。

1993 年美国海军实验室的 Seely 等人<sup>[19]</sup>采用 X 射线正入射显微镜观察了不同激光等离子体的辐射情况。他们采用的显微镜带有两个次镜,放大率分别为 0.8 $\times$  和 2.2 $\times$ ,工作波长 13nm,工作距离 170cm,多层膜为 Mo/Si,反射率达 60%,滤光片为  $1\mu\text{m}$  厚的 Be 膜和  $3\mu\text{m}$  厚的 Si 膜,系统分辨率受 Kodak 101 胶片限制为  $10\mu\text{m}$ 。实验中,他们记录了 20 幅图像,文献中详细介绍了四幅典型的图像。在此我们介绍两幅。图 4 是用放大率为 0.8 $\times$  的显微镜记录到的直径 1mm Nb 丝尖端受 24 束激光按球对称方式打靶时产生激光等离子体辐射的图像。激光波长 351nm,每一路激光能量为 46J,脉宽 600ps,功率密度为  $1.4 \times 10^{14} \text{W}/\text{cm}^2$ ,13nm 波长对应于  $\text{Nb}^{30+}$  辐射跃迁( $\lambda = 13.17\text{nm}$ )。由图像可清楚地看出入射到 Nb 丝侧面和底面激光斑点处的 X 射线发射,整个发射区扩展到 Nb 丝表面外 1mm 处。也可以看出没有受激光直接照射的 Nb 丝上端的 X 射线发射,在 Nb 丝的边缘处这种发射最强,这是由于有一薄层等离子体环绕在 Nb 丝周围,与太阳日冕的 X 射线成像观察到的结果相类似。胶片上 Nb 丝边缘发射的宽度是  $15\mu\text{m}$ ,相当于靶面上的宽度为  $18\mu\text{m}$ 。图 5 是用 2.2 $\times$  的显微镜观察由 24 路激光球对称地打在镀有  $1\mu\text{m}$  厚金层的直径为  $878\mu\text{m}$  的 CH 球上获得的图像。 $1\mu\text{m}$  厚的金不会在激光打靶时全部剥离,这表明等离子体发射全是金等离子体发出的。每一路激光脉冲的能量 40J,脉宽 600ps,波长 351nm,打靶时焦斑尺寸为  $\Phi 390\mu\text{m}$ ,功率密度为  $6 \times 10^{13} \text{W}/\text{cm}^2$ 。从图中可以清晰地看出正面的四个斑点和边缘的八个斑点。球形靶是用镀金直径为几微米的锥形玻璃丝悬挂的,这个玻璃丝没有直接受 351nm 激光照射,而是由较弱的  $1.05\mu\text{m}$  激光照射。金在 12.8 ~ 13.2nm 光谱区无强线谱辐射,但连续谱很强,因此,图中 X 射线来源于连续谱。根据 Henke 等

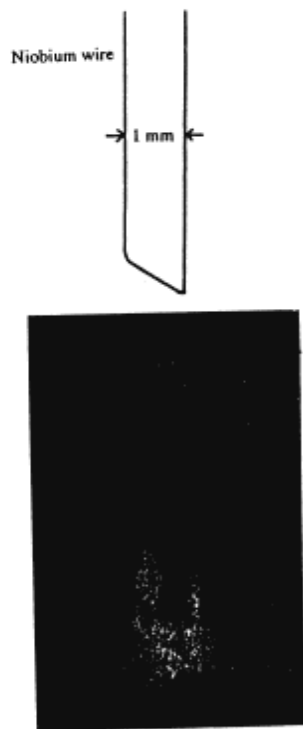


Fig. 4 Image of a 1-mm-diameter Nb wire target recorded by the microscope with magnification, 0.8

这个玻璃丝没有直接受 351nm 激光照射,而是由较弱的  $1.05\mu\text{m}$  激光照射。金在 12.8 ~ 13.2nm 光谱区无强线谱辐射,但连续谱很强,因此,图中 X 射线来源于连续谱。根据 Henke 等

人<sup>[26]</sup>的胶片定标方法,将胶片上的黑度转变成光子密度(光子数/ $\mu\text{m}^2$ ),在激光的焦点处光子密度为  $2.5$  个/ $\mu\text{m}^2$ ,在焦点间的位置上光子密度为  $1.0 \sim 1.5$  个/ $\mu\text{m}^2$ 。再用主镜被照射面积和显微镜的通光效率,将入射到胶片上的光子密度转变为靶的辐射能量密度。在  $12.8 \sim 13.2\text{nm}$  波段,显微镜主镜和次镜的反射率为  $50\%$ , Si 和 Be 滤光片透过率的乘积是  $0.2\%$ 。主镜被照射面积是  $45\text{cm}^2$ ,入射到这个区域的光子数为  $1.3 \times 10^9$  个光子。当假设焦点的辐射立体角为  $2\pi$  时,考虑到激光脉冲宽度  $600\text{ps}$ ,多层膜带宽  $0.4\text{nm}$  时,焦点处的光谱辐亮度为  $2.8 \times 10^6 \text{Wcm}^{-2}\text{nm}^{-1}$ 。当对整个胶片上的像进行求和时,入射到胶片上的光子总数为  $3 \times 10^7$ ,若靶的辐射为  $4\pi$  立体角,则在  $12.8 \sim 13.2\text{nm}$  范围内的辐射能为  $5 \times 10^{-3}\text{J}$ 。

从以上结果可以看出,用 X 射线正入射显微镜可以高分辨率观察较大范围内激光等离子体的准单色辐射像,并可由观测到的结果得到光源光谱辐亮度及观察波段总辐射能,这表明 X 射线正入射显微镜是研究激光等离子体一种强有力的诊断工具。

虽然在 1993 年的文献中就提到使用更短波长 X 射线正入射显微镜的可能性,但直到 1998 年(也就是相隔五年),他们才又完成了用  $4.83\text{nm}$  正入射显微镜研究等离子体软 X 射线发射的均匀性特性<sup>[20]</sup>。这也表明从较长波长( $\lambda = 13\text{nm}$ )过渡到较短波长( $\lambda = 4.83\text{nm}$ )有许多困难。就是前面提到的有关 X 射线正入射显微镜的关键技术的进步和发展。下面简述最新的实验过程和取得的结论。

文献中详述了用正入射显微镜确定由 OMEGA 激光束照射金箔产生软 X 射线的均匀性问题。该实验采用的接收器为分幅相机,显微镜的放大倍率为  $5.8 \times$ ,靶到主镜的距离为  $177.2\text{cm}$ ,两块镜子间的距离为  $71.2\text{cm}$ ,靶到探测器距离为  $419.9\text{cm}$ 。主镜的曲半径为  $130\text{cm}$ ,最大通光孔径  $\Phi 7.62\text{cm}$ ;次镜的曲率半径为  $70\text{cm}$ ,最大通光孔径  $\Phi 2.54\text{cm}$ 。工作波长选为金 O 带发射( $200 \sim 300\text{eV}$ )中的  $4.83\text{nm}$ ( $257\text{eV}$ ),同时它也是 Al 的强线谱  $4.8297\text{nm}$  和  $4.8338\text{nm}$  的位置。多层膜选用 V/C,周期为  $4.87\text{nm}$ 。镜面的表面粗糙度 rms 值为  $0.1\text{nm}$ ,滤光片为沉积在  $100\text{nm}$  Panylene 膜上的  $200\text{nm}$  厚 Al 和沉积在  $500\text{nm}$  Lexan 膜上的  $50\text{nm}$  厚 Ti 组成。

首先用  $130\text{J}$  的 OMEGA 激光聚焦直径为  $400\mu\text{m}$  的光斑打在 Al 膜靶上,用 Kodak 101 胶片接收等离子体像,由照片可以看出等离子体发射是均匀的。显微镜分辨率测量是用总能量  $580\text{J}$  的 6 路 OMEGA 激光共同会聚到  $1\text{mm}$  直径上产生的等离子体照射距靶面  $4.55\text{mm}$  的铜栅网实现的,铜栅网的铜线宽为  $14\mu\text{m}$ ,周期为  $106\mu\text{m}$ 。实验中,在  $1\text{mm}$  直径范围

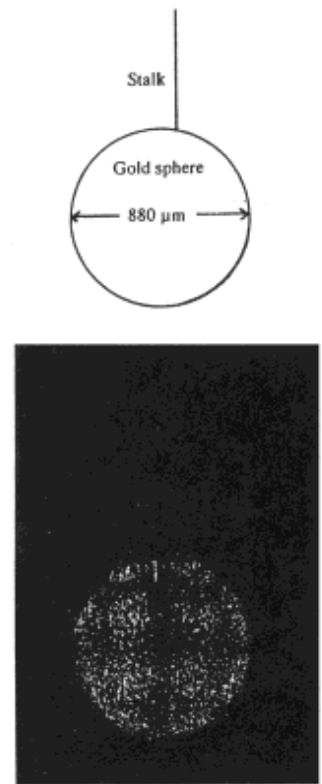


Fig. 5 Image of an  $880\text{-}\mu\text{m}$ -diameter Au-coated spherical target recorded by the microscope with magnification 2.2. The target was irradiated by 24 laser beams in a spherically symmetric pattern.

内可清楚地观察到此栅网的像。接着他们又用分幅相机记录特殊的分辨目标,在  $3\text{ ns}$  激光脉冲启动后的  $1.5\text{ ns}$  时记录了分辨目标的像,由像可以看到  $10\mu\text{m}$  和  $25\mu\text{m}$  的线条(如图 6 所示)。

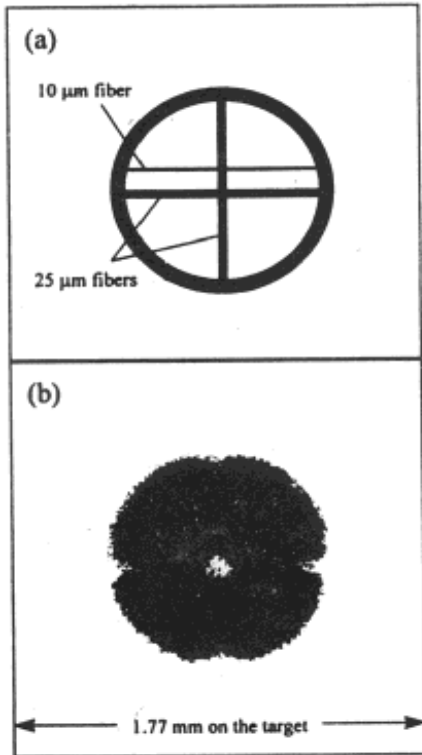


Fig. 6 (a) Schematic of the resolution test target and (b) the soft-x-ray image of the resolution target

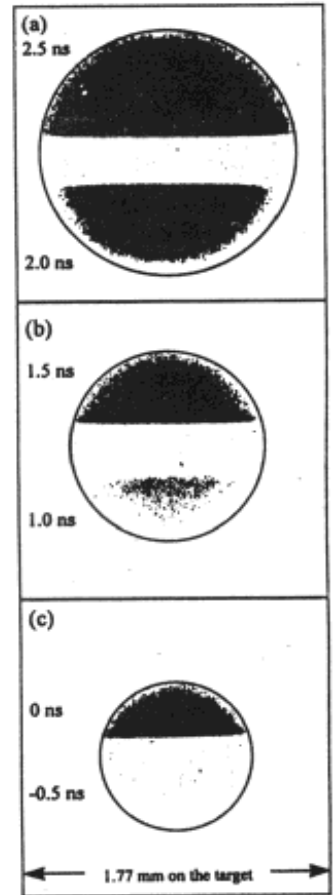


Fig. 7 Soft-x-ray ( $4.83\text{ nm}$ ) images recorded by the multilayer microscope and a gated framing camera at the indicated times after the rise of the laser pulse

为了研究等离子体发射 X 射线的时间演化过程,在分幅相机的两个条纹线间获得一幅等离子体的像,条纹线间的时间间隔为  $0.5\text{ ns}$ 。图 7 示出了在  $3\text{ ns}$  激光照射过程中,不同时间记录到的三个激光脉冲(总能量  $1500\text{ J}$ )会聚照射  $\Phi 1\text{ mm}$  靶面上产生的等离子体像。每个像对应靶面上的正方形宽度为  $1.77\text{ mm}$ 。图中包围着像的圆圈是用来测量在相应时间内发射 X 射线等离子体的大小,可以看出发射 X 射线等离子体大小从激光脉冲刚开始的  $840\mu\text{m}$  变到  $2.5\text{ ns}$  后的  $1610\mu\text{m}$ 。通过转动靶面所在的位置,他们又记录了靶发射的侧面像(如图 8)。靶是  $25\mu\text{m}$  厚的 CH 膜,在膜的一面镀有  $0.5\mu\text{m}$  厚的金,用两束激光(总能量  $1250\text{ J}$ )入射到靶的两面,记录到的像是激光启动后  $2.5\text{ ns}$  的像,由图可知金的辐射很强,而 CH 膜本身的辐射基本上看不

到, 金等离子体辐射最宽的位置在靶面附近, 这表明图 7 所观察到的尺寸代表着等离子体

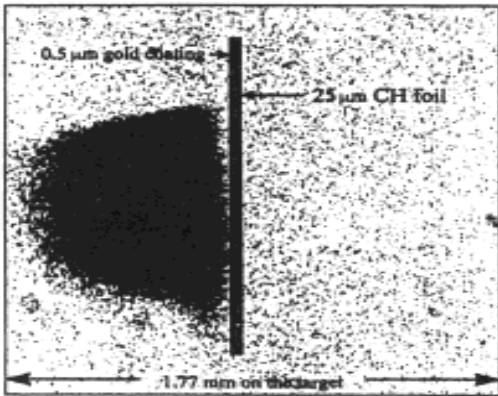


Fig. 8 Side view of a gold-coated CH foil that was irradiated by two beams from each side. The image was recorded 2.5 ns after the rise of the laser pulse. As indicated, the gold coating was on the left side of the foil and the gold plasma was quite bright. The emission on the CH side was absent in the image.

接近靶面的尺寸。由图中等离子体的尺寸可以计算出等离子体的膨胀速度, 文献中得到的速度是随时间逐渐增加的, 在激光脉冲启动后的 2.5 ns 时, 速度增加到  $4.3 \times 10^7$  cm/s。图 7 中所观测到的 X 射线像是光滑无任何特殊结构的。文中还用针孔相机和分幅相机结合拍了能量大于 2 keV 的金等离子体辐射像(如图 9)。由实验结果可看出金等离子体发射硬 X 射线不均匀, 有强发射点, 这与 4.83 nm 软 X 射线发射完全不同。由此文献作者指出:

即使用没有进行不平滑处理的多路光束重叠的 OMEGA 激光产生金等离子体软 X 射线 (257 eV) 发射, 它也适合于间接驱动聚变研究和作需均匀照明应用的光源使用。

通过以上文献结果分析可以得到如下结论, 用正入射显微镜和具有时间分辨本领的分幅相机可以观察准单色光高分辨图像的激光等离子体时间演化过程, 这对于探讨等离子体产生、演变机理具有重要的意义。

## 4 今后工作的设想

我们曾在国内率先完成了激光等离子体作光源, 球面多层膜反射镜作聚光镜,

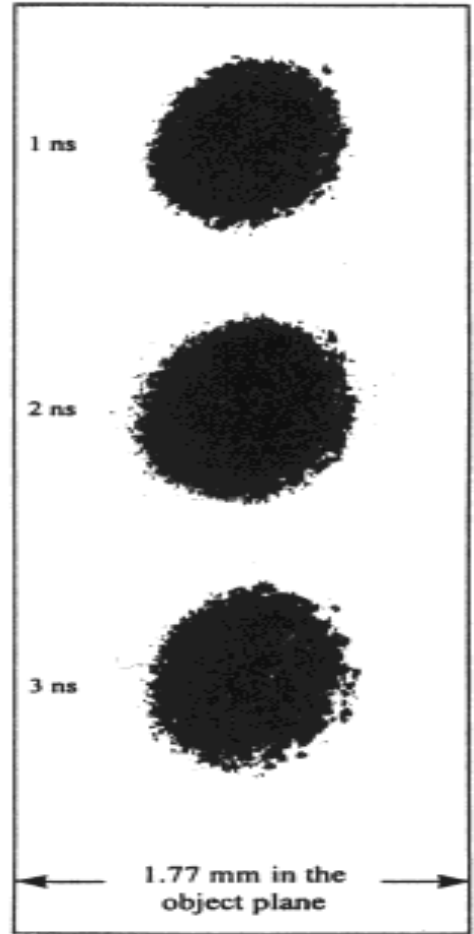


Fig. 9 Hard-x-ray (> 2 keV) images recorded by a pinhole array and a gated framing camera at the indicated times after the rise of the laser pulse.

Schwarzschild 结构作物镜, Al 夹 C 薄膜作滤光片, 工作波长为 18.2nm 的 X 射线正入射显微镜, 显微镜的分辨率已达到微米量级。经过近两年的努力, 我们已在更短的波长上制备了多层膜, 取得了初步的实验结果, 相信再过一段时间, 我们会使这些波段的多层膜有较大水平的进步, 并可制成显微镜。

目前国际上采用正入射显微镜进行等离子体诊断研究的还不多, 这主要是正入射显微镜的工作波长大于 4.4nm, 不适合能量较高的等离子体诊断工具。但从已取得的结果看, 正入射显微镜具有分辨率高、集光面积大、视场大、准单色成像等优点, 可以获得其它方法难以得到的结果。只要很好地利用现有的条件, 加强 ICF 研究和 X 射线光学(包括显微镜)研究两方面人员的联系, 共同寻找可以利用正入射显微镜的领域, 相信会使 X 射线正入射显微镜用在我国的 ICF 研究上, 并取得良好的研究成果。

### 参 考 文 献

- 1 Stearns D G, Rosen R S, Vernon S P. Multilayer mirror technology for soft-x-ray projection lithography. *Appl Opt*, 1993, 32(34): 6952 ~ 6960
- 2 Skulina K M, Milford C S, Bionta R M, Makowiecki D M, Gullikson E M, Soufli R, Knrtright J B, Underwood J H. Molybdenum/beryllium multilayer mirrors for normal incidence in the extreme ultraviolet. *Appl Opt*, 1995, 34(19): 3727 ~ 3730
- 3 Jankowski A F, Perry P L. Characterization of Mo/B<sub>4</sub>C multilayers. *Thin Solid Films*, 1991, 206: 365 ~ 368
- 4 Montcalm C, Sullivan B T, Ranger M, Slaughter J M, Kearney P A, Falco C M, Chaker M. Mo/Y multilayer mirrors for the 8~12nm wavelength region. *Opt Lett*, 1994, 19(15): 1173 ~ 1175
- 5 Montcalm C, Sullivan B T, Duguay S, Ranger M, Steffens W, Pepin H, Ehaker M. In situ reflectance measurements of soft-x-ray/extreme-ultraviolet Mo/Y multilayer mirrors. *Opt Lett*, 1995, 20(2): 1450 ~ 1452
- 6 Rogozin E N, Kolachevsky N N, Mitropolsky M M, Slemzin V A. Characterization of imaging normal-incidence multilayer mirrors for the 40~300Å range by spectroscopic techniques using a laser-plasma radiation source. *Proc SPIE*, 1993, 2012: 209 ~ 218
- 7 Seely J F, Gutman G, Wood J, Herman G S, Kowalski M P, Rife J C, Hunter W R. Normal incidence reflectance of W/B<sub>4</sub>C multilayer mirrors in the 34~50Å wavelength region. *Appl Opt*, 1993, 32(19): 3541 ~ 3543
- 8 Fedorenko A I, Kondratenko V V, Pershin Yu P, Vinogradov A V. Synthesis and measurement of normal incidence x-ray multilayer mirrors optimized for a photon energy of 390eV. *Proc SPIE*, 1993, 2012: 198 ~ 208
- 9 Salaschenko N N, Shamov E A. Short-period x-ray multilayers based on Cr/Sc. *Opt Comm*, 1997, 134: 7 ~ 10
- 10 Underwood J H, Barbee T W. Soft X-ray imaging with a normal-incidence mirror. *Nature*, 1981, 294: 429 ~ 430
- 11 Lovas I, Santy W, Spiller E, Tibbetts R, Wilczynski J. Design and assembly of a high resolution Schwarzschild microscope for soft x-rays. *Proc SPIE*, 1981, 316: 90 ~ 97
- 12 Kado M, Tanaka K A, Kodama R, Yamanaka T, Nakai S, Yamashita K, Ohtani M, Kitamoto S. Development of a Schwarzschild-type x-ray microscope. *Opti Lett*, 1995, 16(2): 109 ~ 111
- 13 Horikawa Y, Nagai K, Mochimatu S, Iketaki Y. A compact Schwarzschild x-ray microscope with a laser-produced plasma source. *J Microscopy*, 1993, 172(3): 189 ~ 194
- 14 Trail J A, Byer R L. Compact scanning soft x-ray microscope using a laser-produced plasma source and normal-incidence multilayer mirrors. *Opt Lett*, 1989, 14(11): 539 ~ 541
- 15 Ng W, Ray~ Chandhuri A K, Liang S, Welnak J, Wallace J, Singh S, Capasso C, Cerrina F, Margaritondo G, Underwood J H, Kartright J B, Perera R C C. New results from MAXIMUM an x-ray scanning pho-

- toemission microscope. Proc SPIE, 1992, 1741: 296 ~ 305
- 16 MacDowell A A, Pastalan J Z, Szeto L H, Tennant D M, Wood O R, Jewell R E, Mansfield W M, Waskiewicz W K, Whith D L, Windt D L. Reduction imaging with soft x-rays for projection lithography, Rev Sci Instrum, 1992, 63: 737 ~ 740
- 17 Tichenor D A, Kubiak G D, Malinowski M E, Stulen R H, Windt D L. Soft x-ray projection lithography experiments using Schwarzschild imaging optics. Appl Opt, 1993, 32(34): 7068 ~ 7071
- 18 Benattar R, Godart J, Bridoux F, Cheauvineau J P, Marioge J P, Phez P. A Schwarzschild microscope to study the preheat of laser heated targets. Proc SPIE, 1986, 688: 171 ~ 175
- 19 Seely J F, Holland G E, Giasson J V. High-resolution imaging of laser-produced plasmas at a wavelength of 130Å by a normal-incidence multilayer mirror microscope. Appl Opt, 1993, 32(31): 6292 ~ 6302
- 20 Seely J F, Holland G E, Boehly T, Pien G, Bradley D. Uniformity of the soft x-ray emissions from gold foils irradiated by OMEGA laser beams determined by a two-mirror normal-incidence microscope with multilayer coatings. Appl Opt, 1998, 37(7): 1140 ~ 1145
- 21 Masui S, Mochimaru S, Watanabe N, Horikawa Y, Yamada H, Kihara H. Evaluation of the Schwarzschild x-ray microscope using the compact SR-ring 'AURORA'. Proc SPIE, 1992, 1741: 94 ~ 103
- 22 Murakami K, Oshino T, Nakamura H, Ohtani M, Nagata H. Schwarzschild microscope for carbon K $\alpha$  radiation. Appl Opt, 1993, 32(34): 7057 ~ 7061
- 23 DiCicco D S, Kim D, Rosser R, Suckewer S. First stage in the development of a soft x-ray reflection imaging microscope in the Schwarzschild configuration using a soft-x-ray laser at 18.2 nm. Opt Lett, 1992, 17(2): 157 ~ 159
- 24 Artyukov I A, Vinogradov A V, Fedorenko A I, Kondratenko V V, Yulin S A. Soft x-ray submicron imaging experiments with nanosecond exposure. Proc SPIE, 1993, 2012: 190 ~ 197
- 25 Wang Z S, Cao J L, Chen B, Ma Y Y, Zhang J P, Chen X D. Schwarzschild microscope at the wavelength of 18nm using a laser-produced plasma source. Proc SPIE, 1995, 2515: 582 ~ 589
- 26 Henke B L, Fujiwara F G, Tester M A, Dittmore C H, Palmer M A. Low-energy x-ray response of photographic films - experimental characterization. J Opt Soc Am, 1984, B1(6): 828 ~ 849

## X-ray Normal Incidence Microscope and Its Application in ICF

WANG Zhan-Shan, CHEN Xing-Dan

(The State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022)

### Abstract

The development of X-ray normal incidence microscope is thoroughly presented and the main technique problems that affect the performance of the X-ray normal incidence microscope are discussed. The available applications in inertial confinement fusion(ICF) are pointed out.

**Key words:** X-ray normal-incidence microscope, Multilayer, Ultrasmooth surface, Filter, Imaging resolution

王占山 男, 研究员, 1985年毕业于天津南开大学物理系, 1988年在中国科学院长春光学精密机械研究所获硕士学位, 1996年在中国科学院上海光学精密机械研究所获博士学位。从参加工作以来, 主要从事短波光学研究。