

聚焦毛细管在极紫外平行光管中的应用

周媛媛^{1,2,3} 周泗忠¹ 邓颖³

¹ 中国科学院西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710119
² 中国科学院研究生院, 北京 100049
³ 中国华阴兵器试验中心, 陕西 华阴 714200

摘要 采用聚焦毛细管将通用的极紫外光源引出法兰口之外, 并控制光束发散角, 以匹配平行光管孔径角。分析计算了直接用光源照亮靶盘的情形, 光束不能充满有效主镜面上的直径; 设计使用聚焦毛细管, 使光束充满平行光管孔径角, 并对极紫外平行光管有无毛细管两种状态进行测试。测试结果表明, 采用聚焦毛细管后, 扩大了光束的发散角, 并且无毛细管的最大光子计数接近 1×10^5 个, 加毛细管后最大光子计数能达到 1×10^4 个。测试数据说明极紫外聚焦毛细管的传输效率可以达到 10%, 能够满足极紫外平行光管的各项技术指标要求。

关键词 光学器件; 极紫外平行光管; 聚焦毛细管; 光束发散角; 孔径角

中图分类号 O439; 130.3120 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.1023001

Application of Focusing Capillary in Extreme Ultraviolet Collimator

Zhou Yuanyuan^{1,2,3} Zhou Sizhong¹ Deng Ying³

¹ Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an, Shaanxi 710119, China
² Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China
³ Huayin Ordnance Test Center, Huayin, Shaanxi 714200, China

Abstract Through using focusing capillary, the extreme ultraviolet (EUV) light source of collimator is channelled out of flange, and the light beam's divergence angle is controlled to match the collimator's aperture angle. This article analyzes and calculates the case of directly using a light source to illuminate target disk and the light beam cannot cover the diameter of the effective primary mirror. Focusing capillary can make the light beam cover the aperture angle of collimator and the two states of the EUV collimator with and without capillary are tested. The results show that using focusing capillary can expand light beam's divergence angle. Besides, the maximum number of photons without capillary is close to 1×10^5 and the maximum number of photons with capillary can reach 1×10^4 . The testing data show that the EUV focusing capillary's transmission efficiency can achieve 10% to meet technical index of EUV collimator.

Key words optical devices; extreme ultraviolet collimator; focusing capillary; divergence angle; aperture angle

OCIS codes 340.7480; 340.7430; 260.7200

1 引言

极紫外波段平行光管能在地面模拟空间真空环境, 提供极紫外平行光, 来检测太阳 X 射线-极紫外 (X-EUV) 成像望远镜空间分辨率以及标定探测器

的工作参数, 这是保证望远镜发射后正常工作

的关键^[1~3]。太阳 X-EUV 成像望远镜工作波段集中在 17~20 nm 范围, 因此 19.5 nm 极紫外波段平行光管是太

收稿日期: 2012-03-29; 收到修改稿日期: 2012-06-04

作者简介: 周媛媛(1978—), 女, 硕士研究生, 主要从事光学工程方面的研究。E-mail: zyymoon1@yahoo.cn

导师简介: 周泗忠(1953—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事光学工程和同步辐射科学仪器等方面的研究。

E-mail: szh@opt.ac.cn

阳 X-EUV 成像望远镜测试标定装置的核心^[4],其中光源采用 X 射线管的改进型,产生的 X 射线和极紫外光能覆盖太阳 X-EUV 成像望远镜的工作波长范围,所以它可以开展 X-EUV 望远镜的标定测试^[5]。

由于 X 射线管光源是高速电子流撞击金属靶产生的,发出的射线发散且不规则,严重减弱了可用射线束的能量,同时平行光管的靶盘根据设计需求采用的是针孔、鉴别率图案和波罗板等^[6],其刻线宽度一般在微米级,直接采用光源的射线束通过小孔或狭缝牺牲了大部分的 X 射线,降低了探测灵敏度和平行光管的光强、能量,并且光束的直径远小于主镜面的有效通光口径。为了解决此问题,采用聚焦

毛细管成像系统,将发散的 X 射线会聚成小的束斑,成像在平行光管的物方焦点上(即靶盘上),从而得到高的光功率密度。

2 光源发散角和光源光强分析及计算

19.5 nm 极紫外平行光管采用德国 Phoenix 公司开发的 EUV 光源,光幅射通量大于 $20 \mu\text{W}$ (硅靶),测得其光强度为 $1.6 \times 10^{12} \text{ photon}/(\text{s} \cdot \text{sr}^{-1})$ 。X 射线光源点位于光源法兰口内 62.5 mm 处,受结构所限,靶盘只能放置在距离光源点 170 mm 的地方,直接用光源照亮靶盘,如图 1 所示。

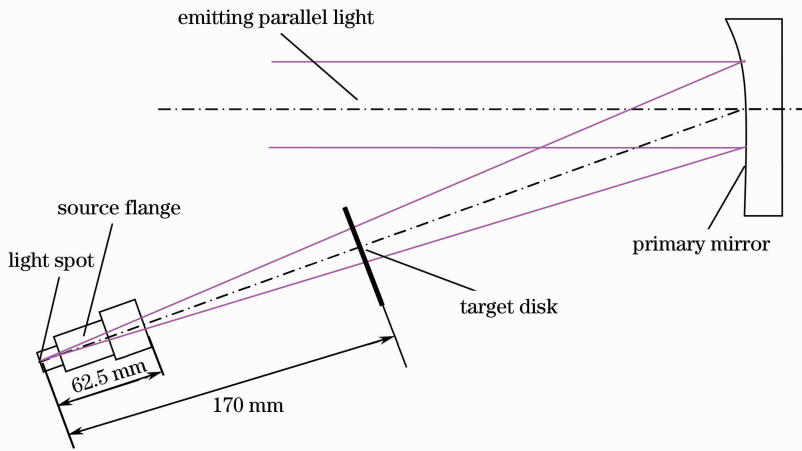


图 1 极紫外平行光管结构

Fig. 1 Extreme ultraviolet collimator's structure

根据平行光管的工作波长 19.5 nm 和被测目标衍射限的要求,按照最小分辨率小于 $100 \mu\text{m}$ 来设计分划板的图形,则 $d=0.1 \text{ mm}$, $l=170 \text{ mm}$,其中 d 为最小分辨尺寸, l 为靶盘距光源点的距离,其对应张角约为

$$\theta_1 = \arctan \frac{d}{l} = \arctan \frac{0.1}{170} = 0.034^\circ, \quad (1)$$

对应立体角为

$$\omega_1 = 2\pi(1 - \cos \theta_1) = 2\pi(1 - \cos 0.034^\circ) = 1.09 \times 10^{-6} \text{ sr}, \quad (2)$$

则穿过小孔的光子数约为

$$1.6 \times 10^{12} \times 1.09 \times 10^{-6} = 1.74 \times 10^6 \text{ s}^{-1}. \quad (3)$$

光束在主镜面上的光斑直径约为

$$(l + f) \times \theta_1 \times \left(\frac{\pi}{180^\circ}\right) = (170 + 2500) \times 0.034^\circ \times \left(\frac{\pi}{180^\circ}\right) = 1.58 \text{ mm}, \quad (4)$$

式中 f 为主镜面的焦距,光斑直径远小于主镜面的有效通光口径 200 mm。

因此,提高光束在靶盘处的发散角,与平行光管的孔径角相匹配,才能使光束充满主镜面有效直径,并且得到高的光能量。

3 聚焦毛细管的应用

3.1 工作原理

在 19.5 nm 极紫外平行光管设计中,使用聚焦毛细管的主要作用是将从 X 射线光源点位置移到光源出光法兰口之外(即靶盘处),另外一个作用是控制发散角的大小,以匹配光管孔径角。X 射线毛细管光学器件,又称 X 射线毛细管光学透镜或者库马霍夫透镜,是最近二十几年新发展起来的一种可以传导、会聚和准直 X 射线的光学元件。它的工作原理基于全反射:当 X 射线以掠入射角(入射射线与管壁表面之间的夹角)不大于全反射临界角 θ_c 入射到空心玻璃毛细管光滑内管壁上时,射线将在管壁之间全反射传输,传输原理如图 2 所示。

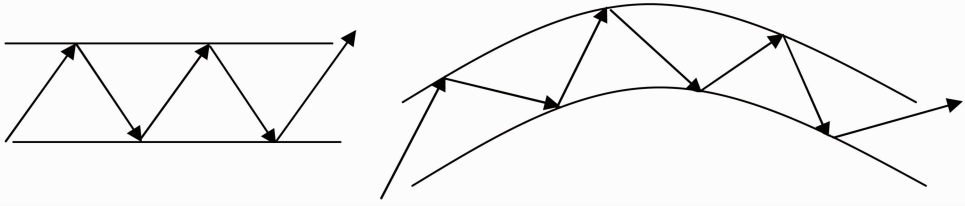


图2 管内全反射示意图

Fig. 2 Diagram of pipe inner total reflection

在 X 射线毛细管中,空心玻璃毛细管起波导作用,X 射线在其中进行多次反射传输,从而可以有效地控制 X 射线的方向。全反射的临界角为

$$\theta_c = \frac{\omega_m}{\omega}, \quad (5)$$

式中 ω_m 为毛细管材料的特征函数,主要取决于反射材料的密度 ρ , ω 为粒子的能量,主要取决于 X 射线波长 λ ^[7]。目前,X 射线毛细管有多毛细管和单毛细管元件两种。早期的毛细管光学透镜,每个毛细管都通过一系列有支撑孔的薄屏,现在通常采用整体式结构,将多根毛细管经过特殊排列加工后,熔结在一起做入保护体内,可以聚焦发散的 X 射线束或将发散射线束变成准平行射线束。经过毛细管传输可以减少射线的衰减,在管内传输的辐射能量正比于 L^{-1} ,而在自由空间中,辐射能量正比于 L^{-2} (L 是射线传输距离)^[8]。近年来利用高精度光纤拉丝塔制作高品质的锥管,这种新型 X 射线单毛细管可以得到比目前经常使用的 X 射线毛细管更小的束斑^[9]。

极紫外平行光管采用的毛细管是整体 X 射线会聚毛细管^[10],此毛细管为单一的、没有支撑部件的多孔玻璃固体,它是由成千上万根空心玻璃纤维管在横截面上呈六方紧密排列堆积而成的一束毛细管阵列,内部由数十万根内径为 $2\sim 5\ \mu\text{m}$ 的单毛细管构成,单毛细管外形母线的径向变化相对于透镜中心轴线是对称的,各有效单毛细管的出口端面的法线统一指向透镜的出口焦斑位置,如图 3 所示。所以,该透镜可

以将一个弧度立体角内任何形状光源发出的 X 射线会聚为圆形微焦斑,形成高能 X 射线源^[11]。

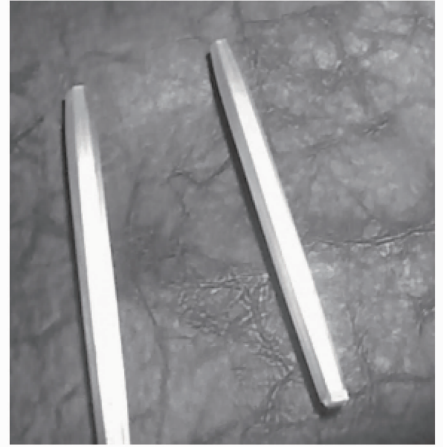


图3 极紫外聚焦毛细管实物

Fig. 3 Extreme ultraviolet focusing capillary

3.2 应用实例

根据 $19.5\ \text{nm}$ 极紫外平行光管的物理要求,经毛细管聚焦后光束的发散角应能与平行光管孔径角匹配,以使光束充满孔径,这是由其焦距及出射端截面的内切圆决定的。特制的极紫外聚焦毛细管经过拉制成形,可以得到实测的前后焦距及外形尺寸,如图 4 所示。其中前焦距 $f_1 = 31.2\ \text{mm}$,后焦距 $f_2 = 67.8\ \text{mm}$ 。其截面形状为正六边形,入射端截面内切圆直径 $D_1 = 8\ \text{mm}$,出射端截面内切圆直径 $D_2 = 7.5\ \text{mm}$,毛细管长度为 $70\ \text{mm}$ 。

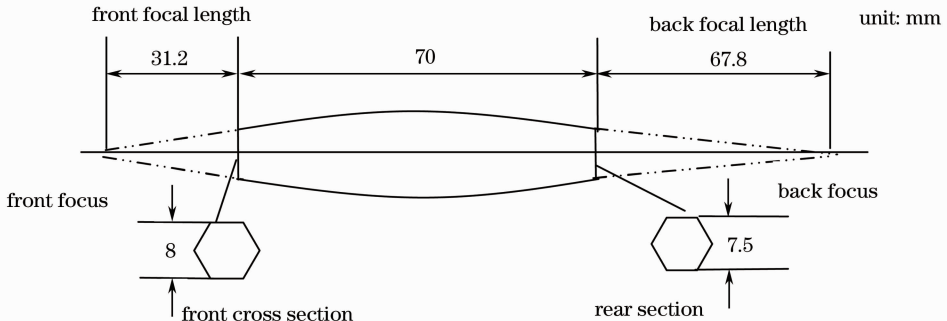


图4 极紫外聚焦毛细管主要尺寸

Fig. 4 Main parameters of the extreme ultraviolet focusing capillary

根据上述参数计算聚焦毛细管的光子强度,毛细管的入射端内切圆直径为 $2R=8\text{ mm}$, 则其面积为 $S=\pi R^2=50.24\text{ mm}^2$ 。毛细管的前焦距为 $f_1=31.2\text{ mm}$, 即其入射端距离光源点 31.2 mm , 则对应的立体角为

$$\omega_2 = \frac{S}{f_1^2} = \frac{50.24}{31.2^2} = 0.052\text{ sr}. \quad (6)$$

那么,通过毛细管入射端进入毛细管的光子数为

$$1.6 \times 10^{12} \times 0.052 = 8 \times 10^{10}\text{ s}^{-1}. \quad (7)$$

毛细管理论传输效率约为 10% , 因此,在毛细管出射焦点位置的光子数为

$$8 \times 10^{10} \times 0.1 = 8 \times 10^9\text{ s}^{-1}. \quad (8)$$

取毛细管的后焦距和后端截面内切圆的直径参数,可以计算聚焦后的光束发散角为

$$\theta_2 = \arctan\left(\frac{D_2/2}{f_2}\right) \times 2 = \arctan\left(\frac{7.5/2}{67.8}\right) \times 2 = 6.33^\circ, \quad (9)$$

而平行光管孔径角为 4.588° , 则光束发散角大于孔径角。光束在主镜面上的光斑直径约为

$$f \times \theta_2 \times \left(\frac{\pi}{180^\circ}\right) = 2500 \times 6.33^\circ \times \left(\frac{\pi}{180^\circ}\right) = 276\text{ mm}, \quad (10)$$

式中 f 为主镜面的焦距,光斑直径大于主镜面的有效通光口径 200 mm , 可以满足系统设计要求。

经过分析计算,只要聚焦毛细管的特性参数满足设计需求,则聚焦后的光源光束可以充满主镜面的孔径,且理论上可以聚焦光源能量,则有聚焦毛细管的极紫外平行光管结构如图 5 所示。

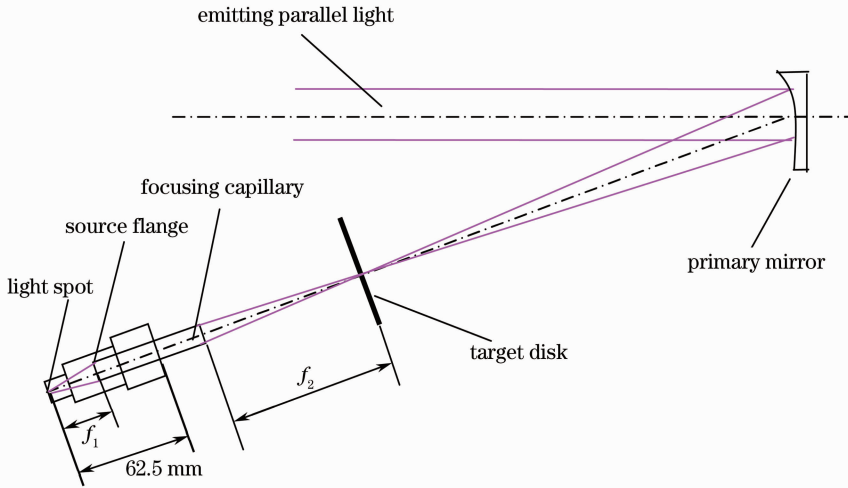


图 5 带聚焦毛细管的极紫外平行光管结构

Fig. 5 Extreme ultraviolet collimator's structure with focusing capillary

4 实验验证

X 射线聚焦毛细管在工程实践中经常得到运用,而为极紫外平行光管研制的极紫外聚焦毛细管,其基本原理可行,需要在实践应用中进行测试和验证。研制完成后可以在 X 光条件下对聚焦毛细管的外形尺寸和前、后焦距进行光能传输效率测试。鉴于以上情况,对平行光管光学性能的测试分别以有、无毛细管检测的状态进行测试。

4.1 带毛细管的测试情况

将紫外光源与平行光管对接,如图 6 所示,在真空实验箱一端用入射直径 2 mm 的光子计数器进行紫外光的相关性能检测。由于紫外光源需要与紫外聚焦毛细管精确对心,要求对紫外光源进行多自由度调整,因此通过光源安装座下方的两个左、右方向

的平移滑台,使光源可以左、右平移,还可以绕垂直方向左、右旋转;在这两个平移滑台下有一个升降台,使光源可以沿竖直方向上、下移动。通过此调节装置调整光源位置,使光源发射点与毛细管焦点重合。由于紫外光不可见,光源在光路中的调整效果目前只能通过光子计数器对光子通量计数来测量,当测量值最大时,说明光源位置已经调好,否则重新通过调节装置调整光源位置,直至找到光子通量的最大测量值为止。

调好光源后,对各网格鉴别率板以及通光孔透光的情况进行测试,网格鉴别率图案中网格宽度分为 $18, 30, 60, 120\ \mu\text{m}$ 四级,测试条件为:光源电压 15 kV , 电流 $3000\ \mu\text{A}$ 。测试结果如表 1 所示。

由表 1 数据绘制曲线如图 7 所示,曲线并不相

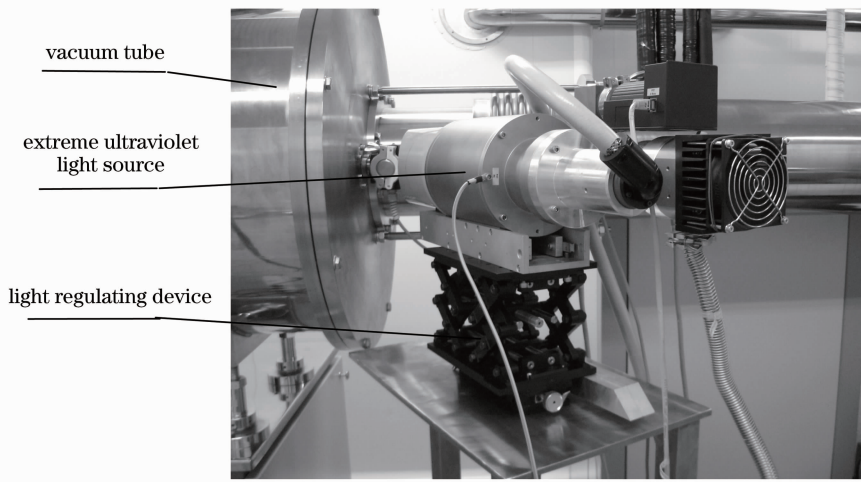


图 6 极紫外光源

Fig. 6 Extreme ultraviolet light source

表 1 带毛细管的试验数据

Table 1 Testing data of the case with capillary

Position of detector /mm	Counting average /(photon/s)				
	Through hole	18 μm grid	30 μm grid	60 μm grid	120 μm grid
0	5039.0	110.2	116.5	72.4	65.6
20	8340.8	314.6	309.8	198.1	166.9
40	11393.4	682.0	694.7	409.8	300.9
60	12334.8	922.3	976.8	622.6	688.5
80	8487.6	897.0	798.1	566.8	457.8
100	6252.4	642.9	527.0	388.0	366.3
120	3847.0	443.7	326.4	266.0	240.4
140	2509.4	312.0	219.6	177.9	163.7
160	1752.2	246.8	160.7	127.1	117.5
180	1194.6	194.7	104.7	78.3	83.4
200	662.8	119.9	65.0	46.5	39.8

对于孔径中心对称,说明光源光轴与平行光管光轴不完全重合,但是从曲线的形状能看出,随着探测器

位置的不同,19.5 nm 极紫外光在经过聚焦毛细管后,无论是通过靶盘上各网格鉴别率板上的网格,还

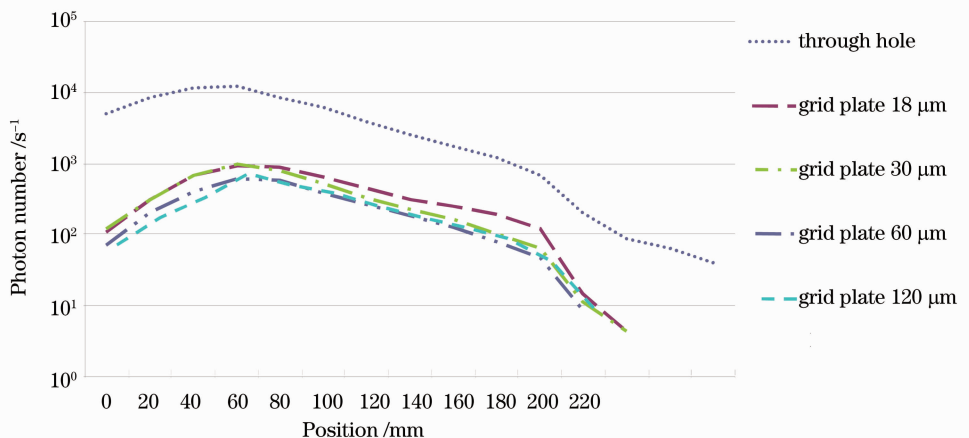


图 7 带毛细管的检测数据绘制的曲线图

Fig. 7 Curves of testing data of the case with capillary

是通过无网格板的通光孔时,所测得的光子数的变化是基本相同的,也就是说光源光束的出射孔径基本相同,这说明聚焦毛细管在通过网格鉴别率板时起到了扩大光束发散角的作用,达到与通过通光孔时一样的效果,只是能量减弱。

4.2 无毛细管的测试情况

由于4个网格板的通光情况类似,因此在调好光源后,仅对18 μm 网格板以及通光孔通光的情况进行测试,测试条件与带毛细管的测试条件相同。测试结果如表2所示。

表2 无毛细管的试验数据

Table 2 Testing data of the case without capillary

Position of detector /mm	Photon number / (photon/s)	
	Through hole	18 μm grid
0	798.9	20.8
20	1839.4	21.8
40	6741.7	32.0
60	57479.4	42.6
80	62202.3	83.6
100	68714.6	301.8
120	77849.9	770.4
140	85748.3	2666.2
160	87462.7	1785.0
180	88962.0	456.8
200	80409.7	212.0
220	2328.0	50.2
240	398.6	5.6

由表2数据绘制曲线如图8所示,从曲线可以看出,在没有聚焦毛细管的情况下,19.5 nm 极紫外光源通过通光孔时,发散角固定不变,基本不受探测器位置影响,所以出射口径没有较大变化。但网格鉴别率板上的网格是小尺寸网格,随着探测器位置的不同,通过网格的极紫外光子数也不同,也就是说

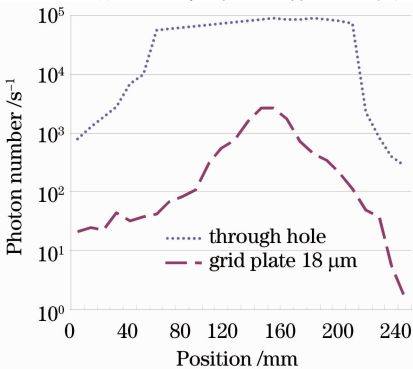


图8 无毛细管的检测数据绘制的曲线图
Fig. 8 Curves of testing data of the case without capillary

出射光口径成比例缩小,这与理论计算结果一致。

另一方面,无毛细管时最高光子计数可接近 1×10^5 个,加毛细管后最高光子计数能达到 1×10^4 个,说明毛细管的通19.5 nm 极紫外光效率虽然比较低,但仍然能达到10%。

5 结 论

紫外聚焦毛细管在19.5 nm 波段下使用,据作者所知这在国内尚属首次。本文主要对在该波段下带毛细管和无毛细管的两种测试情况进行详细的论述,说明极紫外平行光管的光源光束在通过聚焦毛细管照亮靶盘后,1)扩大了光束的发散角,使其与平行光管的孔径角相匹配,2)将极紫外光源点移至靶盘。虽然极紫外聚焦毛细管的传输效率较低,只有10%,但能够满足系统设计需求。紫外聚焦毛细管可以应用在极紫外平行光管中,来改善光源的工作性能。

参 考 文 献

- Gong Yan. Testing system for performance of EUV solar telescope[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2006, **14**(6): 969~973
- 巩岩. 极紫外太阳望远镜成像质量检测系统设计[J]. *光学精密工程*, 2006, **14**(6): 969~973
- Peng Jilong, Li Baoquan, Wei Fei et al.. Space solar extreme ultraviolet (EUV) imaging telescope [J]. *Optical Technique*, 2008, **34**(s1): 92~94
- 彭吉龙, 李保权, 韦飞等. 空间太阳极紫外(EUV)成像望远镜[J]. *光学技术*, 2008, **34**(s1): 92~94
- Gao Liang, Yang Lin, Wang Xiaoguang et al.. Resolution test of extreme ultraviolet telescope [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, **16**(9): 1673~1676
- 高亮, 杨林, 王晓光等. 极紫外太阳望远镜分辨率的检测[J]. *光学精密工程*, 2008, **16**(9): 1673~1676
- Zhao Wei, Yuan Hongtao, Miao Tongqun. The design and fabrication of multilayer mirrors in EUV region [J]. *Optical Technique*, 2008, **34**(3): 341~343
- 赵伟, 袁宏韬, 缪同群. 19.5 nm 极紫外反射镜的研制[J]. *光学技术*, 2008, **34**(3): 341~343
- Chen Bo, Ni Qiliang, Cao Jihong et al.. Development of a space soft X-ray and EUV normal incidence telescope[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2003, **11**(4): 315~319
- 陈波, 尼启良, 曹继红等. 空间软X射线/极紫外波段正入射望远镜研究[J]. *光学精密工程*, 2003, **11**(4): 315~319
- Wang Lei, Wang Shouyin, Zhou Hu et al.. Basic principles and use method of collimator[J]. *Chinese J. Scientific Instrument*, 2006, **27**(6): 980~982
- 王磊, 王守印, 周虎等. 平行光管的基本原理及使用方向[J]. *仪器仪表学报*, 2006, **27**(6): 980~982
- Meng Xianwen, Wang Gao, Huang Liang. The development of X-ray capillary optics lens [J]. *Sci-Tech Information Development & Economy*, 2006, **16**(23): 175~177
- 孟宪文, 王高, 黄亮. X射线毛细管光学透镜的发展[J]. *科技情报开发与经济*, 2006, **16**(23): 175~177
- Xu Xiangdong, Hong Yilin, Fu Shaojun et al.. X-ray capillary optics and applications[J]. *Physics*, 1999, **28**(4): 236~239

- 徐向东, 洪义麟, 付绍军 等. X 射线毛细管及其应用[J]. 物理, 1999, **28**(4): 236~239
- 9 Teng Yuepeng, Sun Tianxi, Liu Zhiguo *et al.*. New type monocapillary X-ray optical device[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(2): 542~545
- 腾玥鹏, 孙天希, 刘志国 等. 一种新型单毛细管 X 光学器件[J]. 光学学报, 2010, **30**(2): 542~545
- 10 Sun Tianxi, Ding Xunliang, Liu Zhiguo *et al.*. Experimental investigation of properties of polycapillary X-ray lens[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(10): 1436~1442
- 孙天希, 丁训良, 刘志国 等. 整体 X 光透镜性能实验研究[J]. 光学学报, 2005, **25**(10): 1436~1442
- 11 Wang Kaige, Wang Lei, Niu Hanben. Microfocal X-ray source and X-ray optical elements[J]. *J. Applied Optics*, 2008, **29**(2): 183~191
- 王凯歌, 王 雷, 牛憨笨. 微束斑 X 射线源及 X 射线光学元件[J]. 应用光学, 2008, **29**(2): 183~191

栏目编辑: 韩 峰