

文章编号 1004-924X(2006)06-0969-05

极紫外太阳望远镜成像质量检测系统设计

巩 岩^{1,2}

- (1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033;
2. 中国科学院 国家天文台, 北京 100088)

摘要:为了在实验室模拟空间环境,检测极紫外太阳望远镜成像质量,提出了由激光等离子光源、Newton 型准直光管系统、背照射 CCD 相机、真空系统等组成的工作波段为 17~30 nm 的极紫外准直光管检测系统,给出了详细的物理分析、光学设计和真空系统设计方法和结果。真空实验测试结果表明,系统在 80 min 内,真空度即可达到 5×10^{-4} Pa 的设计指标,满足极紫外波段检测太阳望远镜的要求。

关键词:极紫外太阳望远镜;性能测试;系统设计

中图分类号:P111.41 文献标识码:A

Testing system for performance of EUV solar telescope

GONG Yan^{1,2}

- (1. State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;
2. National Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100088, China)

Abstract: In order to simulate the outer space's vacuum conditions, and to test the performance of a Extreme-Ultraviolet (EUV) solar telescope, a collimator system working in wavelength of 17~30 nm is presented, which consists of a laser produced plasma source, a Newton type collimator, a back illuminating CCD camera and a high vacuum system. The method and result of the physical design, optical system and vacuum system are described in detail. The test result shows the vacuum grade of the system is 5×10^{-4} Pa after 80 min, and it can meet the test demands of the EUV solar telescope.

Key words: EUV solar telescope; performance test; system design

1 引 言

极紫外望远镜是用于在空间观测太阳结构和活动的天文仪器,主要用于观测和研究日冕、太阳风和磁通量等太阳物理现象^[1]。目前,在轨飞行

的多颗卫星都搭载极紫外太阳望远镜,如美国的 TRACE 卫星、欧空局的 SOHO 卫星及日本的 SOLAR—B 等卫星。长春光机所研制了使用正入射多层膜成像系统的极紫外太阳望远镜样机^[2],该极紫外太阳望远镜在发射升空之前需要在地面对其成像质量,尤其是工作波段的成像质

收稿日期:2006-03-22;修订日期:2006-10-09.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 40674098)

量进行测试和标定^[3-5]。

EUV 波段平行光管是工作在极紫外波段的平行光管,它能在地面模拟空间真空环境,提供极紫外平行光,从而检测太阳成像望远镜空间分辨率以及标定该波段探测器的工作参数。在工作波段检测与标定极紫外太阳望远镜和其探测器是完成极紫外太阳成像望远镜任务必不可少的环节,是保证望远镜发射后正常工作的关键步骤。

2 工作原理

由于极紫外波段光线既不能在空气中传播,也不能在其它物质中传播,所以检测 EUV 望远镜工作波长成像质量采用了透射“网栅”测分辨率的方法。其工作原理是:在极紫外平行光管的焦点处放置一块有确定空间频率和线宽的透射网栅作为成像目标,由极紫外光束照明该网栅,透射光经平行光管后成为平行光束,平行光束照射并充满待测 EUV 望远镜入瞳,再经 EUV 望远镜成像,根据所得透射网栅像即可判断待测望远镜分辨率。由下面简单的关系式即可求出待测望远镜的分辨率:

$$\sigma = \frac{f'}{f_{\text{tube}}} \cdot \sigma_0, \quad (1)$$

式中, f' 和 f_{tube} 分别表示待测望远镜和平行光管的焦距。 σ 和 σ_0 分别表示望远镜焦面上可分辨最小间距和平行光管焦面上网栅线宽。

EUV 波段平行光管采用倒置 Newton 式结构,该结构简单、遮拦比小,其具体技术指标如下:工作波段:17~31 nm;准直度:2";焦距:3 750 mm;真空度:优于 5×10^{-4} Pa。

EUV 光管和待测望远镜采用端对端(end to end)的连接方式,即将望远镜的入瞳端和平行光管的出瞳端采用波纹管连接起来。设计时考虑平行光管的出瞳要大于待测望远镜的入瞳,同时考虑中心遮拦,使平行光管的出射光照亮待测望远

镜的整个入瞳。极紫外太阳望远镜成像质量检测系统测试 EUV 太阳望远镜布置框图如图 1。

3 物理分析

平行光管设计应使 EUV 光源辐射的光经过平行光管系统和待测望远镜系统后能够满足 CCD 探测器成像的光子通量要求,即入射光经系统后在相机里产生的工作电子数要大于相机的读出噪声电子数。

3.1 系统效率分析

按照现在的设计,EUV 光要经过四块多层膜反射镜的反射才能到达 CCD 探测器像面。探测器接受到的光子通量可按下式估算:

$$\Phi = k \cdot \epsilon \cdot \sigma \cdot \Phi_0 \cdot R_{\text{tube}} \cdot R_{\text{tele}}, \quad (2)$$

其中, Φ 、 Φ_0 分别是 CCD 像面和光源到达网栅前的光子通量, R_{tube} 和 R_{tele} 分别是平行光管和望远镜反射率,在 EUV 波段,目前单块多层膜反射镜反射率优于 20%。 ϵ 是孔径系数,即小孔对光源的张角系数,若小孔直径取 5 mm,距离发光点 15 mm,则 ϵ 取 6.9×10^{-3} ; σ 是网栅透过率,取 0.5; k 是遮拦系数,由物理遮拦和系统光学不变量决定,取 0.32。根据以上各参数可知系统的效率为 1.77×10^{-6} 。

3.2 光源选择与 CCD 相机工作可行性分析

用于望远镜工作波长检测的实验室光源主要有两种:空心阴极光源(HC)和激光等离子体光源(LPS)^[6]。空心阴极光源光子辐射通量一般在 1%带宽内可以达到 $10^7 \sim 10^8$ phs./s,激光等离子体光源光子通量在 2%带宽内可达到 10^{14} phs./pulse。依据上面的系统效率计算,这两种光源发出的光辐射经过平行光管和待测望远镜后到达 CCD 像面的光子数分别约为 17~177 phs./s(在 1%带宽内)(HC)和 1.77×10^8 phs./pulse(在 2%带宽内)(LPP)。若待测望远镜像面弥散斑半径为 4.2 mm,对于像元大小为 $13 \mu\text{m}$ 的 CCD 相机,弥散像斑对应像元数为 4×10^5 。对应两种光源每个像元接受的光子数分别约为 $4.25 \times 10^{-5} \sim 4.25 \times 10^{-3}$ phs./(pixel · s)(在 1%带宽内)(HC)和 442 phs./(pixel · pulse)(在 2%带宽内)(LPP)。

选用 Princeton Instrument 公司的软 X 射线背照射 CCD 相机^[7],像元大小 $13 \mu\text{m}$,像元数

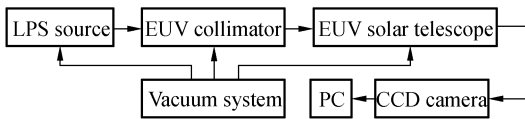


图 1 EUV 太阳望远镜测试系统框图

Fig. 1 Layout of testing system for performance of EUV solar telescope

1 024×1 024。该 CCD 相机读出噪声为 5 个噪声电子(rms)。为了保证相机的信噪比,设计时将相机读出噪声放大到 100 个噪声电子。如果入射光子在 CCD 单位像元上产生的工作电子数大于噪声电子数,则该 CCD 可以用作成像探测器。

根据探测器量子产额定义,按照下式可求出满足 CCD 相机成像要求的电子数^[4]:

$$q = \eta \frac{h\nu}{3.65\text{eV}} \Phi_{\text{pixel}}, \quad (3)$$

其中, q 是 CCD 工作需要电子数, η 为 CCD 量子效率, Φ_{pixel} 为入射到 CCD 成像面一个像元的光子通量。选择激光等离子体光源,按上面的计算可知:单脉冲激光等离子体光源产生的光辐射到达 CCD 一个像元的光子数为 442 phs./ (pixel · pulse)(在 2% 带宽内)。在极紫外波段的 17.1 nm 处,相机量子效率为 0.4,根据式(3)计算可知:若采用激光等离子体光源,则系统单位像元产生的电子数为 3 511 个。考虑到相机工作时,需加带通滤光片,在 17.1 nm 处带通滤光片透过率为 30%,最后产生的工作电子数约为 1 053 个。

由此可见,入射到 CCD 探测器面上的光子产生的工作电子数远大于 CCD 读出噪声电子数。由于该相机暗电流极低,可以忽略。所以采用激光等离子体光源作为检测光源,可以满足 CCD 成像的要求。

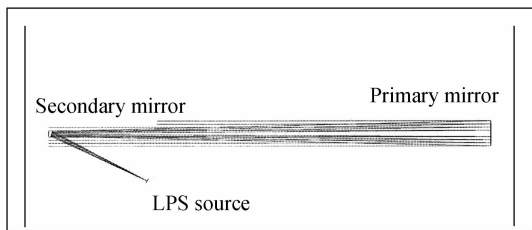


图 2 准直光学系统光路图

Fig. 2 Optical system layout of EUV collimator

4 光学系统设计及可行性分析

在 EUV 波段,只能采用全反射式系统,而且由于光学元件的面形精度和表面粗糙度在这一波段对系统的成像质量影响很大,通常在 EUV 波段工作的光学元件都需要超光滑表面和超高精度面形精度,加工难度大、研制费用高。因此,极紫外平行光管在满足技术指标要求的前提下,尽量

选择结构简单,光学元件少的系统结构。

极紫外平行光管光学系统主要有三种系统可供选择,分别为单球面反射镜系统、双球面反射镜系统和单抛物面反射镜系统。单球面系统像差较大,结构简单;双球面系统和单抛物面系统像质较好,但加工难度大,费用高。极紫外平行光管的相对孔径为 1/25,采用单球面系统基本能够满足要求。为了减小系统的体积,通过一个平面反射镜转折,中心遮拦比约为 1/5,系统长度接近 0.8 f。

极紫外平行光管光学系统设计结果为:焦距: $f=3\ 750\ \text{mm}$;口径: $D=150\ \text{mm}$;F 数: $\text{FN}=25$ 。

根据以上参数,如果检测焦距为 7 000 mm 的望远镜,可知系统总的放大率为 1.87。在 EUV 平行光管焦面上只需放置间距 72 μm 的网栅即可实现检测望远镜 4" 分辨力的需要。

由光学设计软件 ZEMAX^[8] 模拟计算可知:在 38.5 lp/mm 处,平行光管的 MTF 为 0.95,几乎达到衍射极限。这是因为在工作波长 17.1 nm 处,衍射效应对该光管系统几乎没有影响。待测望远镜在 38.5 lp/mm 的 MTF 为 0.75,由此可知整个系统的 MTF 为 0.712 5,满足通常检测和待检系统传递函数乘积大于 0.5 的规则要求。所以用这样的平行光管检测 EUV 望远镜是可行的。

利用 ZEMAX 将 EUV 平行光管和待测 EUV 望远镜集成,在工作波长得到系统的 MTF,从而判断系统的工作性能。图 3 为集成后系统的 MTF 曲线。

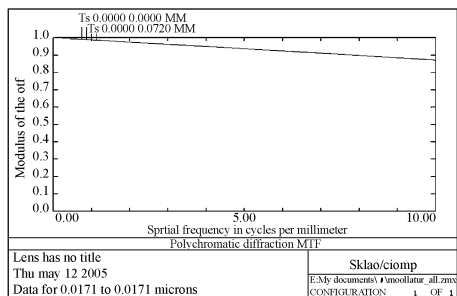


图 3 系统对接后的光学系统 MTF 与空间频率理论计算曲线

Fig. 3 MTF curve vs. spacial resolution

由图可见,10 lp/mm 的空间分辨频率对应系统的 MTF 接近 0.9,此时对应 EUV 望远镜的分

辨率在 $1.5''$ 。在 $1''$ 分辨率时, 系统 MTF 也达到 0.8。所以, 用 EUV 平行光管可以完成 EUV 望远镜的成像性能测试任务。

5 真空系统设计^[9,10]

由于极紫外辐射光能极易被空气吸收, 所以整个系统要求为无油真空环境, 真空度要求好于 4×10^{-4} Pa。

根据结构设计, 平行光管内腔直径为 320 mm, 望远镜内腔直径为 374 mm, 每个通道直径为 120 mm。两部分连接后, 整个系统真空内表面积为 3.88 m^2 , 容积为 0.3 m^3 。真空室材料为不锈钢(1Cr18Ni9Ti), 1 h 后出气率约为 $2.3 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{L}/(\text{s} \cdot \text{cm}^2)$, 2 h 后出气率约为 $1.5 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{L}/(\text{s} \cdot \text{cm}^2)$ 。计算初始参数为: 真空室工作压力: $p = 4 \times 10^{-4}$ Pa; 真空室放气量: $Q_1 = 1.3 \text{ Pa} \cdot \text{L}/\text{s}$; 系统总漏气率: $Q_2 = 6.7 \times 10^{-1} \text{ Pa} \cdot \text{L}/\text{s}$; 被抽气体为 20°C 干燥空气;

5.1 保持工作压力的真空系统有效抽速计算

$$S = Q/p$$

其中 $Q = Q_1 + Q_2 + Q_3$ 。 Q_3 为真空室表面 1 h 的出气量。

$$Q_3 = 2.3 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{L}/(\text{s} \cdot \text{cm}^2) \times 38\,800 \text{ cm}^2 = 0.9 \text{ Pa} \cdot \text{L}/\text{s}$$

$$\text{计算后得: } S = 2.87/4 \times 10^{-4} = 2208 \text{ L}/\text{s}$$

考虑可靠性, 增大 20%, 则实际要求有效抽速 2 650 L/s。

5.2 抽气时间计算

(1) 粗抽时间(忽略管导对抽气速率影响):

$$t = 2.3K_q \frac{V}{S_p} \lg \frac{p_i}{p}$$

V 是真空容积, S_p 是前极机械泵的抽速, 为 32 L/s; p_i 是开始抽气压力, 一般取 1×10^5 (一个大气压); p 是经 t 时间抽气后压力, 对于分子泵启动, 前极泵压力通常为 2 Pa, 此时, 修正系数 K_q 取 4, 则:

$$t = 4 \times 2.3 \times 0.3 \times 10^3 / 32 \lg(10^5/2) \approx 11 \text{ min}$$

(2) 分子泵抽到工作压力所需时间

由 2 Pa 抽到 5×10^{-4} Pa, 主要考虑出气的因素。1 h 后的出气量 $Q_3 = 0.9 \text{ Pa} \cdot \text{L}/\text{s}$, 则此时真空室压强:

$$p = Q_3/S = 0.9/2\,650 = 3.3 \times 10^{-4} \text{ Pa}$$

由以上计算可以看出, 经过 1 h 抽真空, 基本能达到系统对真空度的要求, 证明 EUV 光管的真空系统设计是可行的。

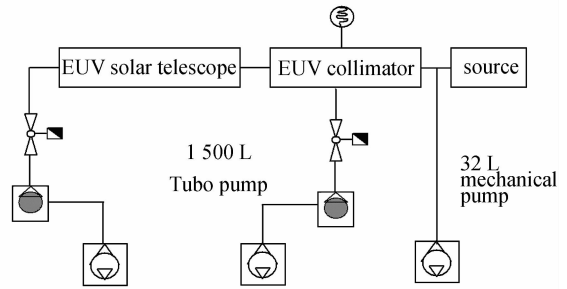


图 4 检测装置真空系统布置示意图

Fig. 4 Schematic of Vacuum system

6 真空测试结果

极紫外太阳望远镜成像质量检测系统照片如图 5 所示。图 6 给出了系统真空度和抽气时间的关系曲线。由图可见, 系统在 80 min 内, 真空度即可达到 5×10^{-4} Pa 的设计指标, 满足极紫外波段检测太阳望远镜的要求。

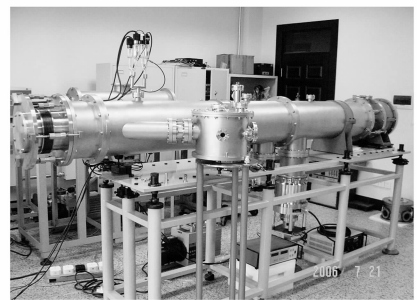


图 5 EUV 太阳望远镜检测系统照片

Fig. 5 Picture of test system for performance of EUV solar telescope

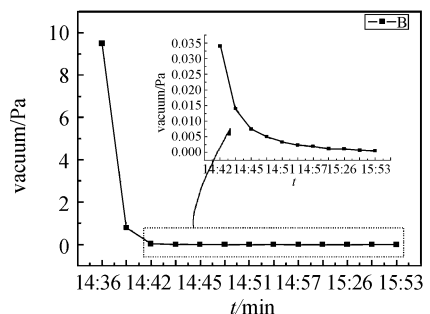


图 6 检测系统真空性能测试曲线

Fig. 6 Vacuum curve vs. pumping time

7 结束语

以上介绍了在实验室条件下模拟空间环境,在 17~30 nm 工作波段对极紫外太阳望远镜成像质量进行检测的系统方案设计。系统由激光等

离子光源、Newton 型 EUV 准直光管系统、背照射 CCD 相机、真空系统等组成。给出了详细的物理分析、光学设计和真空系统设计方法和结果。真空实验测试结果表明,系统在 80 min 内,真空度即可达到 5×10^{-4} Pa 的设计指标,满足极紫外波段检测太阳望远镜的要求。

参考文献:

- [1] 巩岩,送谦,叶彬洵. EUV 波段 CCD 相机及其空间分辨率测试[J]. 光学精密工程,2005,13(增刊):56-59.
GONG Y, SONG Q, YE B X. CCD camera in EUV spectral region and its spatial resolution test[J]. *Opt. Precis. Eng.*, 2005, 13(supp.):56-59. (in Chinese)
- [2] 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.
CHEN B, NI Q L, CAO J H, *et al.* Development of a space soft X-ray and EUV normal incidence telescope[J]. *Opt. Precis. Eng.*, 2003, 11(4):315-319. (in Chinese)
- [3] JELINSKY S R, WELSH B, JELINSKY P, *et al.* Two normal incidence collimators design for the calibration of the extreme ultraviolet explorer[J]. *SPIE*, 1988, 982:387-393.
- [4] DERE K P, MOSES J D, DELABOUDINIÈRE J P, *et al.* The preflight photometric calibration of the extreme -ultra-violet imaging telescope EIT[J]. *Solar Phys.*, 2000, 195:13-44.
- [5] SONG X. *Characterization and radiometric calibration of the solar telescope EIT by means of synchrotron radiation (between 10 and 100 nm)*[D]. University of Paris-South, 1995.
- [6] 薛玲玲,陈波,尼启良,等. 17.1 nm 波段光电成像系统分辨率的实验研究[J]. 光学精密工程,2005,12(5):225-230.
XUE L L, CHEN B, NI Q L, *et al.* Experimental study of the resolution of an optoelectronic imaging system at 17.1 nm based on MCP detector[J]. *Opt. Precis. Eng.*, 2005, 12(5):225-230. (in Chinese)
- [7] ZENG G M, DAIDO H, NAKAYAMA S, *et al.* Plasma X-ray source of various materials produced by compact solid state lasers[J]. *SPIE*, 1994, 2015:45-56.
- [8] http://www.roperscientific.de/X-Ray_Cameras.html[Z].
- [9] Focus Software Incorporated. ZEMAX optical design program user's guide, version 9.0[Z]. Tucson, USA. March 2000.
- [10] 达道安. 真空设计手册[M]. 北京:国防工业出版社,2004.
DA D A. *Manual of vacuum design*[M]. Beijing: National Defense Press, 2004. (in Chinese)
- [11] 赵宝升. 真空技术[M]. 北京:科学出版社,1998.
ZHAO B SH. *Vacuum technology*[M]. Beijing: Science Industry Press, 1998. (in Chinese)

作者简介: 巩岩(1968—),男,博士,副研究员。1990年毕业于浙江大学光仪系,1998年获硕士学位,2003年获博士学位,现在中国科学院长春光学精密机械与物理研究所应用光学国家重点实验室工作,国家天文台博士后。主要研究方向为光学系统总体设计,短波段光学技术,空间太阳望远镜及其检测技术。E-mail: gongy@sklao.ac.cn.