

# EAST 托卡马克等离子体广角红外与可见光集成诊断系统设计

杨晓飞<sup>1</sup>, 甘开福<sup>2</sup>

- (1. 苏州大学 物理与光电·能源学部 江苏省先进光学制造技术重点实验室  
教育部现代光学技术重点实验室, 江苏 苏州 215006;  
2. 中国科学院等离子体物理研究所, 安徽 合肥 230031)

**摘要:** 针对 EAST 托卡马克等离子体中波红外与可见光集成诊断系统进行了设计。系统采用独特的光路形式, 使成像指标满足的同时, 尽量避免光学元件受到辐射和污染; 通过采用分色方式, 实现中波红外与可见光两路同口径、同视场成像, 提高了观测效率。最终设计完成了通光口径 3 mm, 视场  $58^\circ \times 47^\circ$  的广角红外与可见等离子成像系统。装调后对各项指标测试结果表明, 系统性能达到设计要求。通过对 EAST 托卡马克装置的放电过程成像实验表明, 系统红外与可见两路实现了广角、清晰等离子成像。

**关键词:** 中波红外与可见光诊断; 托卡马克装置; 等离子体成像; 折反射结构

**中图分类号:** TH744 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)12-3656-05

## Design of infrared and visible optical diagnostic system with wide field for EAST Tokamak plasma

Yang Xiaofei<sup>1</sup>, Gan Kaifu<sup>2</sup>

- (1. Key Lab of Modern Optical Technologies of Education Ministry of China, Key Lab of Advanced Optical Manufacturing Technologies of Jiangsu Provinc, College of Physics, Optoelectronics and Energy, Soochow University, Suzhou 215006, China;  
2. Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

**Abstract:** A middle infrared and visible optical diagnostic system was designed for EAST Tokamak plasma. Through adopting innovate optical structure, the system satisfied the imaging requirements, and avoided the radiation and stain at the same time. And through using dichroic beam split mode, the middle infrared and visible path can image with common aperture and filed, which improved the observation efficiency. At last the wide-angle infrared and visible plasma imaging system was designed, with 3 mm aperture diameter and  $58^\circ \times 47^\circ$  field of view. After alignment, the optical performance was tested, and the results show that all of the indexes satisfy the requirement the system. Through the imaging experiment for the discharge process in the EAST tokamak, the middle infrared and visible path of the system can image with wide-angle and high contrast synchronously.

**Key words:** middle infrared and visible diagnostic; Tokamak device; plasma imaging; catadioptric structure

收稿日期: 2015-04-05; 修订日期: 2015-05-10

基金项目: 国家自然科学基金(61008034); 江苏高校优势学科建设工程资助项目; 国际热核聚变实验堆(ITER)计划专项(2014GB101)

作者简介: 杨晓飞(1977-), 男, 副研究员, 博士, 主要从事光学设计、光学非球面数控加工、光学装调技术方面的研究。

Email: yangxiaofei@suda.edu.cn

## 0 引言

托卡马克(Tokamak)是一环形装置,依靠等离子体电流和环形线圈产生的强磁场,将极高温等离子体状态的聚变物质约束在环形容器里,以此创造氦、氘实现聚变的环境和超高温,实现人类对聚变反应的控制。相比于其他受控核聚变方式,托卡马克拥有很多优势,世界各国都非常重视对其的研究与投入。中国在 1993 年成功建成 HT-7 托卡马克装置<sup>[1]</sup>,成为继俄罗斯 T-15、法国 Tore-Supra 和日本 JT-60U 之后第 4 个拥有同类大型装置的国家<sup>[2]</sup>。2006 年中国自主设计、建造的新一代热核聚变装置 EAST 成功完成首次放电实验,其性能达到国际先进水平<sup>[3-4]</sup>。

为观察放电期间限制器与等离子体之间的相互作用、等离子体位移变化等信息,并对其物理现象进行分析,国内外托卡马克装置都研制了光电成像观测系统,波段覆盖从 X 射线到长波红外,等离子体光电成像已成为卡马克内部物理过程诊断的关键技术之一<sup>[5]</sup>。

国际热核实验堆(ITER)研究人员在 2007 年设计并装配一套红外可见系统,采用一片不锈钢打孔平面和离轴椭球面非球面,加上一组卡塞格林系统,配合一组校正镜组,实现红外与可见成像<sup>[6]</sup>。

文中对 EAST 托卡马克装置中波红外与可见光成像诊断系统研制过程进行了介绍。该诊断系统采用独特的光路结构,使其适应装置内部特殊的环境,尽量减少内部光学元件受到的辐射和污染。系统通过分光方式,实现了中波红外与可见光同口径、同视场成像,提高了观测的效率。

## 1 系统性能要求

图 1 所示为托卡马克环形装置。

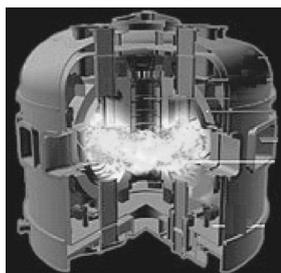


图 1 EAST 托卡马克装置

Fig.1 EAST Tokamak device

按照观测目标特性,系统要求对中波红外与可见光两个波段同视场、同时成像;为了使观测范围覆盖托卡马克装置的内壁、外壁、各窗口及天线等重要目标,系统要求在水平和垂直两个方向同时具有较大视场;由于腔体内部结构复杂,系统必须有较大景深,以满足整个观测区域内同时清晰成像。

由于放电过程中装置内部电磁环境恶劣,高能粒子、X 射线大量溅射,系统需具有防辐射能力,以避免光学元件的污染。另外装置内部的强烈杂光及高温(高达 250℃以上)要求系统具有有效的杂光抑制和温度适宜能力<sup>[7-9]</sup>。

## 2 光学设计指标

成像系统在托卡马克装置内部的安装位置及观测范围如图 2 所示,按照目标范围确定系统的视场角为竖直方向(X 方向) $\pm 29^\circ$ ;水平方向(Y 方向) $-29^\circ \sim +18^\circ$ ,对角线视场达到  $70^\circ$ 。由安装角度光路需要折转  $131^\circ$ 。

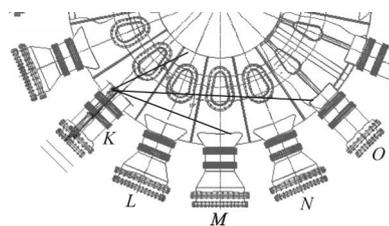


图 2 EAST 腔内水平方向观测区域

Fig.2 Observation region of EAST cavity in horizontal direction

视场范围确定后,由相机参数即可确定系统焦距,采用的红外与可见相机参数分别如表 1、2 所示:

表 1 红外相机参数

Tab.1 Parameters of infrared camera

Parameter	Value
Pixel number	640×512
Pixel size/ $\mu\text{m}$	15×15
Image size/mm	9.6×7.68
F/#	3

表 2 可见相机参数

Tab.2 Parameters of visible camera

Parameter	Value
Pixel number	1 280×800
Pixel size/ $\mu\text{m}$	20×20
Image size/mm	25.6×16

由以上参数,确定中波红外系统焦距为 9 mm,可见系统焦距为 18 mm,通光口径均为 3 mm。红外波段范围 2~5.5  $\mu\text{m}$ ,可见光波段范围为 0.48~0.78  $\mu\text{m}$ 。

### 3 光学结构设计

#### 3.1 前端系统设计

光路结构整体设计中要考虑尽量减少装置内等离子体及杂质溅射对光学元件的污染。因此系统采用折反射二次成像结构,前端反射系统采用一块凹椭球镜和一块平面反射镜,以平面上的小孔为系统通光口径,从而将辐射限制在小孔范围内。如图 3 所示。

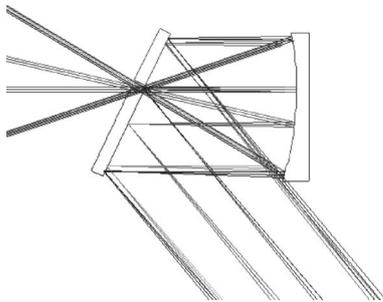


图 3 前端反射系统结构

Fig.3 Structure of front reflective system

前端的反射系统第一像面位于平面反射镜上,因此打在小孔上的光线无法反射进入后面的折射系统成像,因此在轴上视场附件形成一个盲点,设计中应使盲点在视场中的位置避开重要观测区域。

为使相机及成像透镜等避免腔内高温、高辐射损坏,折转后首先通过准直透镜将光路延长,使后端组件位于托卡马克装置外部。由于分色之前系统为红外与可见共用,因此反射镜镀膜及准直透镜材料的选择均应考虑在 0.48~5.5  $\mu\text{m}$  波段范围内具有较高的透过率。为此反射镜镀金膜,准直透镜选择 ZNS 材料。

光路经过准直后,在光瞳附件通过分色平板反射可见光,透射中波红外。在分色前为一块隔真空窗口玻璃,通过对密封组件加工安装的严格控制,确保其在  $10^{-5}$ ~ $10^5$  Pa 压强范围内空气泄露率低于  $10^{-10}$  Pa· $\text{m}^3$ · $\text{s}^{-1}$ 。为保证可见与红外同时透过,密封玻璃同样采用 ZNS 材料。

#### 3.2 红外系统设计及结果

红外光路为实现相机的冷阑匹配,分色后首先通过一块锗透镜成像,形成第二像面,而后通过后面

成像镜组完成冷阑匹配及成像,如图 4 所示,在成像镜组中间安装滤光片及衰减片。

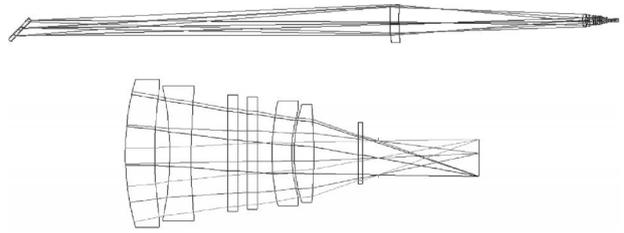
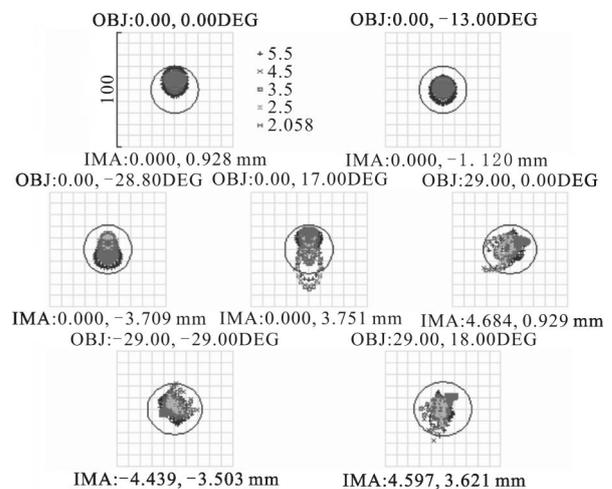
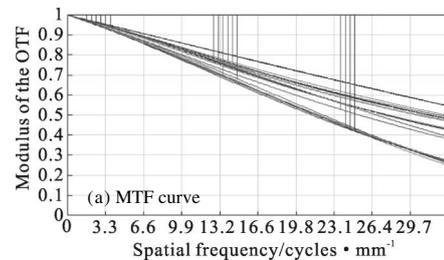


图 4 中波红外光路

Fig.4 Middle infrared optical path

由于系统在 Y 方向上视场不对称,因此相机需要响应地沿 Y 方向平移,平移量为约 1 mm,由于冷阑与相机连接在一起,而冷阑为系统实际光阑,因此冷阑的平移使整个系统光阑与光学元件光轴有一个平移量,从而使各个光学元件均在离轴情况下使用,通过分析发现各元件上的离轴量及对整体像质影响都不大。

最终红外系统成像质量如图 5 所示,由传递函数曲线可以看出在相机 Nyquist 频率处 (33 lp/mm),轴上视场 MTF>0.5,边缘视场 MTF>0.3;由系统点列图可以看出红外系统成像质量接近衍射极限;系统边缘最大视场(29°、-29°)相对中心视场照度为 62%,边缘视场最大畸变为 11%。



(b) Spot diagram

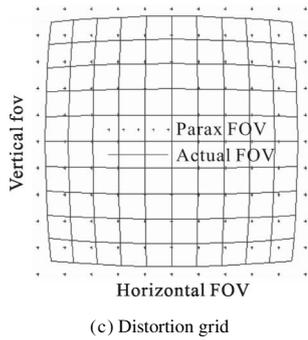


图 5 中波红外系统成像质量

Fig.5 Imaging quality of middle infrared system

### 3.3 红外系统杂光分析以及抑制方式

光学系统杂光包括:透镜表面冷射、视场外光线直接进入系统到达靶面和经过内部筒壁散射形成的杂散光、元件自身辐射(温度不高时中波波段辐射量很小),以上冷反射可以通过系统定标去除,主要是视场外光线的拦截和筒壁散射的消除。

### 3.4 可见系统设计及结果

可见光波段经过分色平板反射后,通过前后两个镜组成像,在两组之间安装滤光片和衰减片。由于可见光波段范围较宽,且前端系统为两路共用,使可见系统设计压力较大,设计中重点是对色差的校正,为此前镜组中的第一块负透镜采用 ZnS 材料,以补偿 ZnS 准直透镜对色差的影响,后端成像镜组采用高折射率的 HZF62。如图 6 所示。

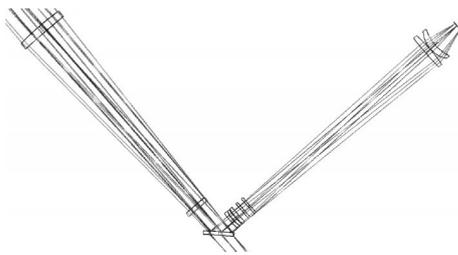
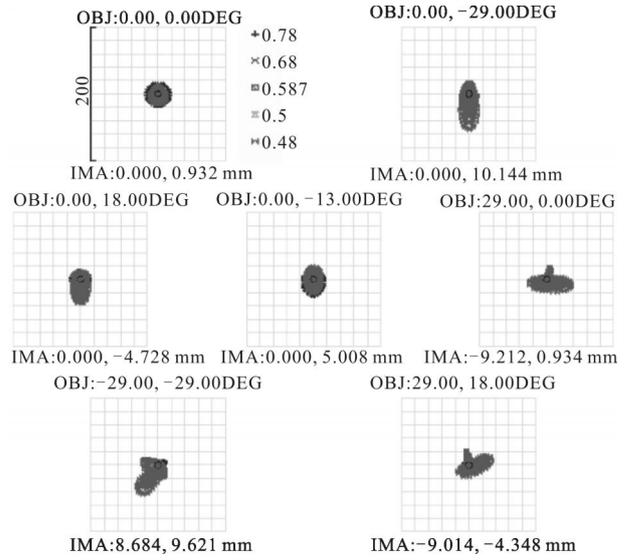
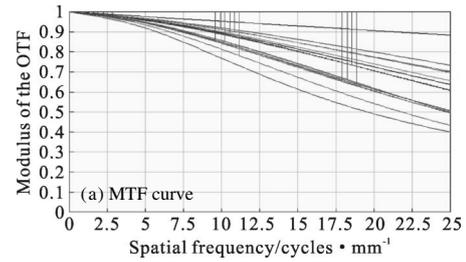


图 6 可见波段光路

Fig.6 Visible optical path

系统成像质量如图 7 所示,可以看出在相机 Nyquist 频率处(25 lp/mm),轴上视场 MTF>0.6,边缘视场 MTF>0.4;系统边缘最大视场(29°、-29°)相对中心视场照度为 48%,边缘视场最大畸变为 12.5%。

系统整体结构如图 8 所示,系统前端反射镜与分色平板距离 1 793 mm,分色平板与红外相机距离 1 208 mm,分色平板与可见相机距离 598 mm,结构尺寸满足安装要求。



(b) Spot diagram

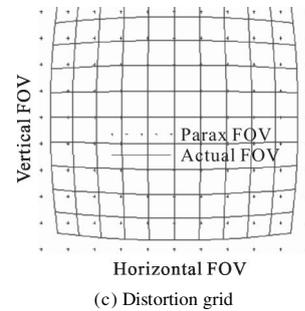


图 7 可见系统成像质量

Fig.7 Imaging quality of visible system

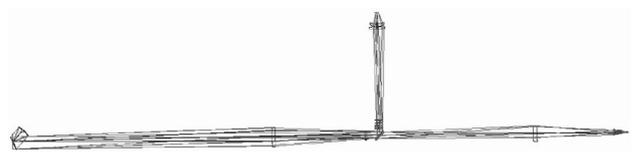


图 8 整体光路结构

Fig.8 Whole structure of system

系统经过装调后,对视场范围、分辨率、采集速度、杂光等进行了测试,结果表明两路的各项性能指标均达到设计要求。装调后的系统如图 9 所示。将其安装到 EAST 托卡马克内如图 10 和图 11,观测图像效果如图 12 所示,观测区域及盲点位置都与设计位置一致。



图 9 装调后系统

Fig.9 System after alignment



图 10 实际安装图

Fig.10 Actual installation view

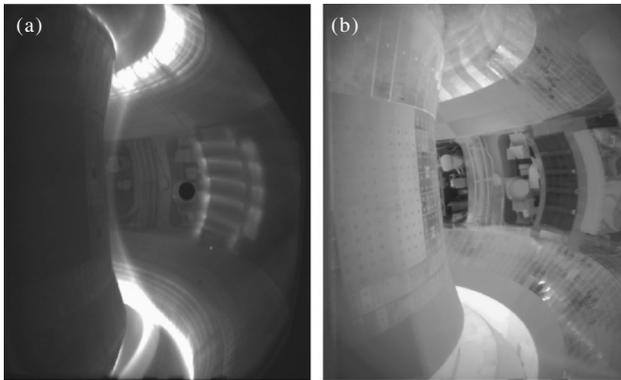


图 11 系统采集的等离子图像

Fig.11 Plasma image acquired by system

## 4 结论

文中对 EAST 托卡马克装置中波红外与可见光成像诊断系统研制过程进行了介绍。由于使用环境的要求,系统采用了折反射光路结构,通过分色方式实现中波红外与可见光同口径、同视场成像,提高了系统的观测效率,并达到广角观测要求。通过对装调后各项指标测试表明,系统性能达到设计要求。通过在托卡马克装置上对放电过程进行的观测实验表

明,系统实现了红外与可见光同时清晰成像。

## 参考文献:

- [1] Xu Ming. Application of ECE imaging and study of sawtooth reconnection activities on EAST [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2011. (in Chinese)
- [2] Gao Li, Zhuang Ge, Hu Xiwei, et al. Visible light CCD imaging system on J-TEXT tokamak device [J]. *Science Technology and Engineering*, 2008, 8 (2): 353-356. (in Chinese)
- [3] Yang Limei, Yu Liming, Yu Deliang, et al. Doppler shift spectroscopy for the measurement of ion species of HL-2A neutral beam injector[J]. *Nuclear Fusion and Plasma Physics*, 2009, 29(4): 361-364. (in Chinese)
- [4] Han Xiaoyu, Duan Xuru, Yang Limei, et al. The system design of CXRS diagnostic on HL-2A tokamak [J]. *Nuclear Fusion and Plasma Physics*, 2011, 31 (3): 228-234. (in Chinese)
- [5] Evensen H T, Durst R, Fonck R J, et al. Optical diagnostic to measure ion temperature and parallel velocity fluctuations on the tokamak fusion test reactor [J]. *Rev Sci Instrum*, 1995, 66(1): 845-847.
- [6] Gauthier E, Roche H, Thomasa E, et al. ITER-like wide-angle infrared thermography and visible observation diagnostic using reflective optics[J]. *Fusion Engineering and Design*, 2007, 82: 1335-1340.
- [7] MarmarE S, BoivinR L, Granetz R S, et al. High resolution visible continuum imaging diagnostic on the Alcator C-Mod Tokamak[J]. *Rev Sci Instrum*, 2001, 68: 940-943.
- [8] Chen Wenzhang. CXRS spectral analysis on Tokamak facility [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2011. (in Chinese)
- [9] Wu Yuanjie, Zhu Jianhua, Hao Yi, et al. Optical signal acquisition system design of charge-exchange recombination spectroscopy on HL-2A Tokamak facility[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2012, 39(6): 96-101. (in Chinese)