

# 神光-Ⅲ汤姆孙散射诊断的集光系统设计

闫亚东<sup>1</sup> 卢卫涛<sup>1,2</sup> 董晓娜<sup>1</sup> 何俊华<sup>1</sup> 刘西站<sup>1</sup> 张 敏<sup>1</sup> 张彭舜<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 中国科学院西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710119)  
<sup>2</sup> 中国科学院研究生院, 北京 100049)

**摘要** 设计了应用于神光-Ⅲ装置的汤姆孙散射光收集系统。采用折反式双卡塞格林结构, 实现了在有限口径内长距离的像传递, 解决了紫外透射材料选择困难的问题。通过纠正镜的优化设计, 使超长焦距透镜的加工、检测简化。通过选择适当的中间像面的放大倍率, 降低了次反射镜的遮光比。通过在一次像面附近增设透射光学元件, 实现了两组光学系统的有效耦合。在中间像面设置十字分划板方便了系统安装瞄准操作。系统总长 5 m, 最大元件口径 190 mm, 视场范围  $\phi 2$  mm, 放大倍率为 1.5, 物方  $F$  数为 10, 物方分辨率优于 20  $\mu\text{m}$ 。

**关键词** 成像系统; 汤姆孙散射; 卡塞格林; 光学系统设计; 遮光率

**中图分类号** TH744.3; TH824 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.0611002

## Design of Collective Optic System for Thomson Scattering Measurements on Shenguang-Ⅲ Facility

Yan Yadong<sup>1</sup> Lu Weitao<sup>1,2</sup> Dong Xiaona<sup>1</sup> He Junhua<sup>1</sup> Liu Xizhan<sup>1</sup>

Zhang Min<sup>1</sup> Zhang Pengshun<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an, Shaanxi 710119, China)  
<sup>2</sup> Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract** A Thomson scattering signal collective optic system is designed for Thomson scattering measurements on Shenguang-Ⅲ facility. The optical system is composed of two coupled Cassegrain systems, and has an intermediate image plane. This configuration makes the optical path length long enough to transmit the scattering signal to the camera outside the target chamber. The catadioptric system makes it easier to balance chromatic aberration as there are few ultraviolet materials available. The corrector lens which has a long focal length is replaced by two faster corrector lenses, which make the fabrications and measurements easier. The obscuration ratio is reduced by choosing a proper intermediate magnification. The two refraction lenses beside the intermediate image plane help to couple the two systems well. A reticle is set at the intermediate image plane for system aiming and can be removed before event recording. This system has the total length of more than 5 m, with the maximal elements diameter of 190 mm. The field of view is 2 mm, the magnification is 1.5, and the object space  $F$ -number is 10, and the resolution is better than 20  $\mu\text{m}$ .

**Key words** imaging systems; Thomson scattering; Cassegrain; optical system design; obscuration ratio

**OCIS codes** 110.0110; 120.0120; 180.0180; 220.0220

## 1 引 言

在激光核聚变研究中, 激光-等离子体的相互作用已成为一个重要的研究领域<sup>[1]</sup>。入射激光在等离子体中的吸收效率与等离子体的各种状态参数有着密切的关系, 因此精确测量等离子体的密度, 电子和

离子温度、速度和其分布等参数, 对于深入研究激光等离子体的散射机制, 提高激光与靶的耦合效率具有十分重要的研究价值。在等离子体的诊断技术中, 基于激光汤姆孙散射<sup>[2~10]</sup>的主动诊断技术具有非接触式、高时空分辨和实验结果处理较易等特点,

收稿日期: 2010-11-29; 收到修改稿日期: 2010-12-31

基金项目: 西部博士基金(200929441213)资助课题。

作者简介: 闫亚东(1979—), 男, 博士, 助理研究员, 主要从事强激光精密诊断与应用技术等方面的研究。

E-mail: yyd@opt.ac.cn

已发展成为一种重要的诊断手段而被广泛采用<sup>[11~14]</sup>。

本文论述了一种汤姆孙散射光收集光学系统的设计方法。论述了在 200~800 nm 波段光学系统的选型、纠正镜的设计、中间像面的设置、系统遮光比和系统透射率等问题。给出了光学系统的设计结果,并对成像质量进行了评价。

## 2 光学系统技术指标及选型

### 2.1 光学系统关键技术指标要求

系统搭载在神光-III 主机公共搭载平台(DIM)上(具有 25 mm 厚的石英真空密封窗);光学系统物方  $F$  数为 10;物方分辨率小于  $20 \mu\text{m}$ ;系统放大倍率为 1.5;视场范围大于  $\Phi 2 \text{ mm}$ ;消色差波段为 200~800 nm。其系统如图 1 所示。

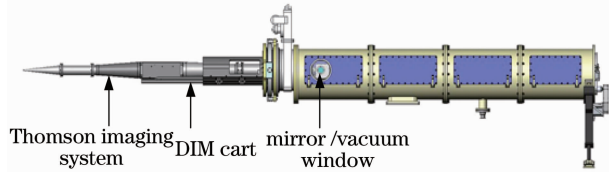


图 1 DIM 系统安装图

Fig. 1 System installation of DIM

### 2.2 光学系统选型

光学系统的类型大体上可以分为透射式、反射式和折反式光学系统。本系统是弱信号收集系统,对光学系统(尤其对 263 nm 波长)的透射率要求较高。透射式光学系统因在消色差材料选取上因透射率的原因而受到极大制约,难以满足需要;反射式光学系统无色差,但是欠校正球差很大,通常将主镜设计成抛物面,副镜设计成双曲面来消除这个欠校正的球差,使得系统加工难度增大、成本增加,况且本系统中石英保护玻璃和石英密封窗口引入大量色差,因此也不宜采用全反射光学系统,只能采用折反式光学系统。

采用经典的卡塞格林折反系统<sup>[15~18]</sup>,主副镜均采用球面,在光路中放置弯月型纠正镜纠正系统像差。

由于采用 DIM 承载,从散射光收集系统出射的光束需经 DIM 侧窗出射,最终成像在 DIM 腔体之外的记录设备上,据此计算成像光路总长不能小于 5000 mm;另外,系统口径受到 DIM 的限制(截面小于  $200 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$ )。在集光立体角和放大倍率一定的情况下,单一的卡塞格林系统很难满足系统要求。因此采用双卡塞格林结构进行像面传递,即在第一个卡塞格林系统像面之后,倒置放置第二个

卡塞格林系统,使前者的像面做为后者的物面,也就是散射光收集系统的中间像面。

## 3 光学系统设计

从材料选择、像差校正、中间像面放大倍率的选择、系统耦合和安装瞄准方法等几个方面介绍光学系统的设计方法。

### 3.1 材料选择

系统的材料选择主要考虑系统工作波段、工作环境和研制成本 3 个因素。在 200~800 nm 波段,普通光学材料紫外透射率很低无法使用,只能采用特殊的材料,如石英和  $\text{CaF}_2$  晶体等,但后者的成本较高。对于神光-III 主机装置,其驱动能力较原型装置有了大幅提升,靶室内的 X 辐射将很强,普通的光学材料在长时间经历 X 射线辐射之后材质将变暗、透射率降低,因此,系统采用石英作为保护玻璃和纠正镜的材料。系统的主反射镜采用普通的 K9 光学材料。次反射镜因考虑到其与纠正镜胶合,二者膨胀系统尽量一致而采用石英材料。

### 3.2 纠正镜设计

如果系统前半部分按照经典的卡塞格林光学系统进行设计,其结构如图 2 所示。从靶点散射的光依次经过保护玻璃、纠正镜、主反射镜和次反射镜到达像面。前半部分系统总长 1800 mm,放大倍率为 3,最大口径为 180 mm。其中次反射镜是通过在纠正镜背面中心镀一个铝反射圆盘而成。这种结构简洁,易于加工、装配。但是,纠正镜的焦距达到 113 m,给加工、检测带来较大困难<sup>[19~22]</sup>。另外,次反射镜和纠正镜后面必须具有相同的曲率半径,这种约束在一定程度上影响系统的像差纠正。为了解决上述问题,将前半部分光学系统设计成如图 3 所示的结构。

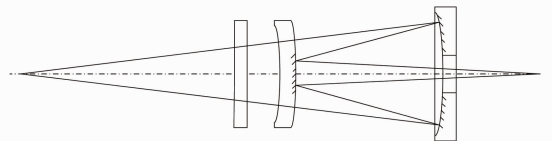


图 2 经典的卡塞格林系统

Fig. 2 Classical Cassegrain system

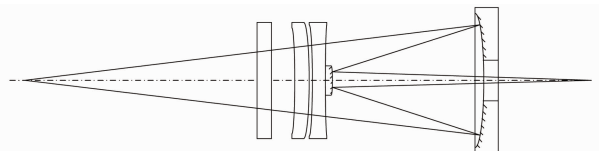


图 3 变形卡塞格林系统

Fig. 3 Reformed Cassegrain system

在图 3 中,将焦距很大的纠正镜分离为一正一负两个透镜,其焦距分别为 2.3 和 -2.4 m,二者组合等效于一个焦距很大的纠正镜,有利于加工、检测。图 3 中的次反射镜的曲率半径不依赖于纠正镜,在系统优化过程中是自由变量,有利于充分纠正系统像差。但是卡塞格林系统的变形结构也同时带来两个缺点:1)纠正镜分离之后,系统复杂化,不利于系统透射率的提高;2)次反射镜分离之后,需要与后纠正镜同心胶合,系统的装配精度要求提高。但是,综合考虑得失本系统仍然采用变形后的结构。

### 3.3 双卡塞格林系统设计

卡塞格林系统是非常经典的光学系统,但双卡塞格林系统并不是两个卡塞格林系统的简单对接,

在其设计过程中,除了遵循单卡塞格林系统的设计方法之外,还有 3 个值得注意的问题。1)双卡塞格林系统中间像面的放大倍率对整个系统的性能起着非常关键的作用,它直接影响次反射镜的遮光比,从而影响系统的集光效率以及系统分辨率;2)前组系统的出瞳与后组系统的入瞳重合是二者有效耦合的关键;3)由于系统尺寸庞大、操作不便,必须采取可操作性强的安装瞄准措施。

图 4 为汤姆孙散射光收集系统的设计结果,它由前组卡塞格林系统和倒置的后组卡塞格林系统构成,中间包含一次像面。在后组光路中,光束经过一个倾斜放置的平面反射镜将光束折转 90°,经 DIM 的侧窗出射。

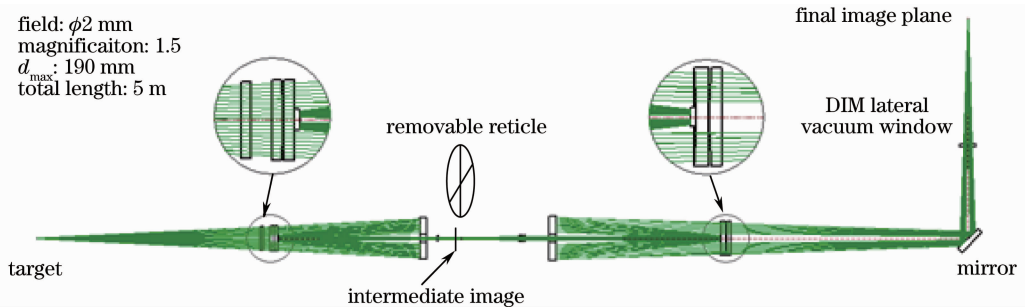


图 4 双卡塞格林系统图

Fig. 4 Scheme of two-Cassegrain system

#### 3.3.1 中间像面放大倍率的确定

中间像面是系统为了在有限口径内实现较长光路而设置的中继像面,但在设计中发现:中间像面设置不同的放大倍率,次反射镜的最佳口径就不同,如图 5 所示。可见次反射镜的口径随放大倍率的增大而减小,当放大倍率为 1 时,次反射镜的遮光口径占

入射光口径的 1/1.7,遮挡率约为 35%;当放大倍率为 3 时,次反射镜的遮光口径占入射光口径的 1/4,遮挡率约为 6.25%;当放大倍率达到 5 时,次反射镜的遮光口径占入射光口径的 1/6.5,遮挡率约为 2.4%。

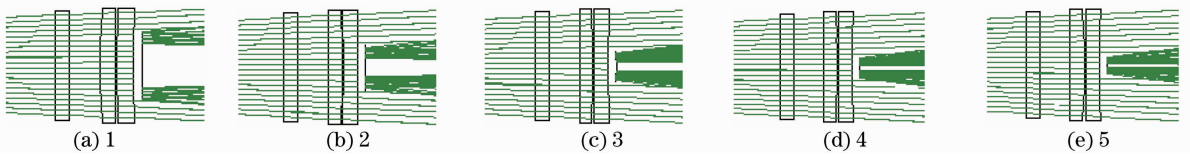


图 5 次反射镜口径随放大倍率的变化

Fig. 5 Diagram of minor reflector varies with magnification, number is Fig. is magnification

当次反射镜遮挡率降低时,系统的衍射艾里斑减小,系统的极限分辨率提高,散射光集光效率也得到提升。理论上次反射镜的遮挡率越小对光学系统性能的提高越有利;但是从工程的角度考虑,当次反射镜的口径降到一定程度后,对其面形精度、表面光洁度和安装定位等的要求都会相应地提高。况且当次反射镜口径降到一定程度后,其遮挡率变化缓慢,对光学系统性能的影响不明显。因此,可以根据具体情况适当降低中间像面的放大倍率,以降低对加

工和装配的要求。本系统的中间像面的放大倍率选择 3,由整体系统的放大倍率 1.5 可以计算得出后组卡塞格林系统的放大倍率为 2,将其倒置使用时,后组系统对中间像面缩小 50% 成像,从而使得双卡塞格林系统的放大倍率为 1.5。

#### 3.3.2 系统耦合

由于汤姆孙散射集光系统由两组卡塞格林系统组成,除了前组系统的像即为后组系统的物之外,前后组系统的孔径光阑也要构成另外一对物像关系,

只有这样才能实现两组光学系统的有效耦合,保证耦合的过程中没有成像光束溢出光学元件。在设计中,前后组卡塞格林系统的光阑都放在主反射镜镜面上。在整个光学系统光路中,前组系统的光阑面依次经过前组次反射镜、中间像面和后组次反射镜,到达后组系统的光阑面。可见,前后两组系统的次反射镜负担过重:1)要校正各自分系统的像差;2)要将两组系统的孔径光阑构成一对物像关系,系统的像差校正受到一定的影响。为了缓解次反射镜的负担,在中间像面的两侧各增加一组透射光学元件(如图4所示)。这两组透射元件位于像面附近,其口径较小、厚度较薄,对整个系统的透射率的影响较小。在增设了辅助耦合透射光学元件之后,系统的成像质量得到了较大提高。

### 3.3.3 系统安装瞄准方法

由于光学系统的体积大、视场小( $\Phi 2\text{ mm}$ ),且工作在不可触及的真空密闭环境中,为了获得最佳的实验效果,必须将光学系统精确、方便地安装到位。因系统由DIM承载,其调节功能由DIM执行,现存的问题是如何判断系统是否安装到位。为了解决这一问题,在一次像面位置设置可移动的十字分划板(如图4所示)。十字分划板装在电动导轨上,系统瞄准时切入光路;待瞄准之后,撤出光路;分划板的设置使系统的瞄准操作变得非常简单直观。

## 4 像质评价

整个光学系统的像点弥散斑如图6所示。在200~800 nm范围内,像点最大几何弥散斑半径小于 $6.5\text{ }\mu\text{m}$ ,其均方根半径为 $2.92\text{ }\mu\text{m}$ ,远小于 $15\text{ }\mu\text{m}$ ,但是由于系统物方数值孔径的限制以及次反射镜遮挡的原因,其衍射艾里斑半径接近 $15\text{ }\mu\text{m}$ ,系统的分辨率受到衍射极限的制约。如图7所示,系统传递函数在 $34\text{ lp/mm}$ 处达到0.5以上。因此,系统能够满足物面小于 $20\text{ }\mu\text{m}$ 的分辨率要求。

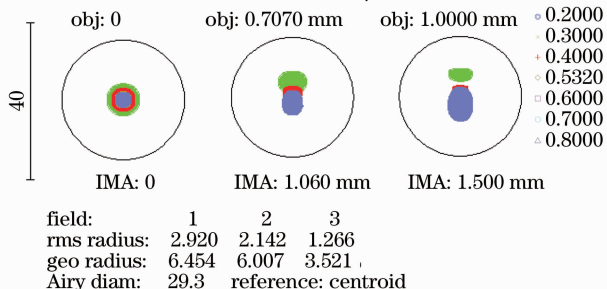


图6 点列图

Fig. 6 Spot diagrams

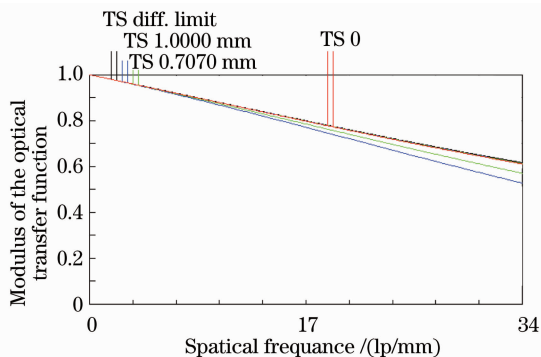


图7 调制传递函数

Fig. 7 Modulation transfer function

## 5 系统透射率

系统中大量使用了石英光学材料,折射光学元件较多。光学材料的内部吸收、光学元件表面的反射、散射损耗和次反射镜的遮挡,使得系统的透射率受到较大影响。由于国外石英玻璃在200~800 nm范围内透射率较高(0.999/10 mm),而国内石英材料的透射率相对较低(0.85~0.93/10 mm),因而系统全部采用国外石英材料。在折射光学元件表面镀减反膜(界面透射率优于99.8%)且主次反射镜的反射率优于99.5%的情况下,计算得出的系统透射率如表1所示。

表1 光学系统透射率

Table 1 Optical system transmissivity

Wavelength /nm	Transmissivity /%
200	65.83
263	65.83
300	65.83
400	65.83
532	65.86
600	65.86
700	65.86
800	65.77

## 6 结 论

设计了采用折反式双卡塞格林结构的光学系统,实现了在有限口径内长距离的像传递,解决了紫外透射材料选择困难问题。通过纠正镜的优化设计,避免了超长焦距透镜的加工和检测的困难。通过选择适当的中间像面的放大倍率,降低了次反射镜的遮光比。通过在一次像面附近增设透射光学元件,实现了两组光学系统的有效耦合。在中间像面设置十字分划板方便了系统安装瞄准操作。采用国外光学材料,提高了系统透射率。光学系统像质评

价表明,该系统是一个成像质量较好的光学系统。

### 参 考 文 献

- 1 William L. Kruer. The Physics of Laser Plasma Interactions [M]. Westview Press, January, 2003
- 2 J. Gao. Laser intensity measurement by Thomson scattering[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, **88**(9): 091105
- 3 A. B. Reighard, R. P. Drake, T. Donajkowski *et al.*. Thomson scattering from a shock front [J]. *Rev. Sci. Inst.*, 2006, **77**(10): 10E504
- 4 D. H. Froula, J. S. Ross, L. Divol *et al.*. Thomson scattering measurements of high electron temperature hohlraum plasmas for laser plasma interaction studies [J]. *Phys. Plasmas*, 2006, **13**(5): 052704
- 5 S. H. Glenzer, W. E. Alley, K. G. Estabrook *et al.*. Thomson scattering from laser plasmas[J]. *Phys. Plasmas*, 1999, **6**(5): 2117~2128
- 6 S. Y. Chen, A. Maksimchuk, D. Umstadter. Experimental observation of relativistic Thomson scattering[J]. *Nature*, 1998, **396**(6712): 653~655
- 7 D. H. Froula, J. S. Ross, L. Divol *et al.*. Thomson-scattering techniques to diagnose local electron and ion temperatures, density, and plasma wave amplitudes in laser produced plasmas [J]. *Rev. Sci. , Inst.* 2006, **77**(10): 10E522
- 8 B. Amini, F. F. Chen. Thomson scattering detection of plasma waves excited by two laser beams [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1984, **53**(15): 1441~1444
- 9 H. A. Baldis, C. J. Walsh, R. Benesch. Thomson scattering on a 20-psec time scale[J]. *Appl. Opt.*, 1982, **21**(2): 297~302
- 10 W. Rozmus, S. H. Glenzer, K. G. Estabrook *et al.*. Modeling of Thomson scattering spectra in high-Z, laser produced plasmas. *Astrophys. J. Suppl.* (in press) [C]. 28<sup>th</sup> Annual Anomalous Absorption Conference, Bar Harbor, ME. June 14-19, 1998
- 11 R. Connell, D. J. Hartog, M. T. Borhardt *et al.*. Optimizing a Thomson scattering diagnostic for fast dynamics and high background[J]. *Rev. Sci. Inst.*, 2008, **79**(10): 10E735
- 12 B. P. LeBlanc. Thomson scattering density calibration by Rayleigh and rotational Raman scattering on NSTX[J]. *Rev. Sci. Inst.*, 2008, **79**(10): 10E737
- 13 H. Yoshida, O. Naito, O. Yamashita *et al.*. Multilaser and high spatially resolved multipoint Thomson scattering system for the JT-60U Tokamak[J]. *Rev. Sci. Inst.*, 1999, **70**(1): 751~754
- 14 R. Prentice, P. Nielsen, M. Gadeberg. First results from Thomson scattering on JET[J]. *Rev. Sci. Inst.*, 1985, **56**(5): 1070
- 15 H. J. Seki, M. G. Samant. Use of cassegrain system for in situ Raman scattering study of cyanide ions on a palladium electrode [J]. *Appl. Spectrosc.*, 1993, **47**(7): 952~956
- 16 J. F. Seely, G. E. Holland, J. V. Giasson. High-resolution imaging of laser-produced plasmas at a wavelength of 130 Å by a normal-incidence multilayer-mirror microscope[J]. *Appl. Opt.*, 1993, **32**(31): 6294~6302
- 17 R. D. Sigler. Compound Schmidt telescope designs with nonzero petzval curvatures [J]. *Appl. Opt.*, 1975, **14**(9): 2302~2305
- 18 R. D. Sigler. Family of compact Schmidt-Cassegrain telescope designs [J]. *Appl. Opt.*, 1974, **13**(8): 1765~1766
- 19 Fu Lianxiao, Wu Yonggang, Li Xinglong *et al.*. Manufacture and test of Cassegrain system's primary mirror with large relative diameter and lightweight[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(4): 764~767
- 付联效, 吴永刚, 李兴隆等. 大相对口径轻量化卡塞格林系统主镜的加工检验[J]. *光学学报*, 2008, **28**(4): 764~767
- 20 Tang Guomao, He Yumei, Liao Zhou. Radial Hartmann method for measuring large optical system[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(3): 795~799
- 汤国茂, 何玉梅, 廖周. 大型光学系统径向哈特曼像质检测方法[J]. *中国激光*, 2010, **37**(3): 795~799
- 21 Hou Changlun, Bai Jian, Hou Xiyun *et al.*. The measurement of long focal length based on Talbot effect of Ronchi grating[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(11): 1328~1330
- 侯昌伦, 白剑, 侯西云等. 基于龙基光栅塔尔博特效应的长焦距测量[J]. *光学学报*, 2002, **22**(11): 1328~1330
- 22 Li Yao, Bai Jian, Deng Yan *et al.*. Study on a wavefront detection system for long-focus lens by sub-wavefront scanning [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(9): 2590~2595
- 李遥, 白剑, 邓燕等. 子波面扫描法长焦距透镜波面检测系统研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(9): 2590~2595