

文章编号 1004-924X(2021)02-0259-08

激光聚变冲击波速度测量光学系统设计

闫亚东*, 韦明智, 李 奇, 王 维, 齐文博, 何俊华
(中国科学院 西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710119)

摘要: 针对激光聚变冲击波速度测量的需求, 设计了一种集被动式扫描高温计和主动式冲击波速度测量于一体的复合冲击波速度测量系统。通过采用多种耐辐射光学玻璃材料, 实现了共用光路的 400~700 nm 耐辐射消色差设计; 通过采用自动控制干涉仪简化了系统操作; 主动测速系统通过切换不同焦距的中继成像镜头, 实现了不同放大倍率的切换。系统的物方视场为 $\varphi 2.0$ mm, 主动式测速系统的放大倍率为 $10\times, 20\times, 30\times$, 静态实验干涉条纹平直, 调制度达到 0.69 以上, 物方分辨率达到 $4.72 \mu\text{m}$ 。该系统在激光聚变装置上能够实现冲击波速度的动态测量。

关键词: 光学系统设计; 速度干涉仪; 多普勒频移; 扫描高温计

中图分类号: O435; TH74 文献标识码: A doi: 10.37188/OPE.20212902.0259

Design of optical system for laser fusion shock velocity measurement

YAN Ya-dong*, WEI Ming-zhi, LI Qi, WANG Wei, QI Wen-bo, HE Jun-hua

(Xi'an Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China)

* Corresponding author, E-mail: yyd@opt.ac.cn

Abstract: To meet the demands of laser fusion shock velocity measurements, a composite system that integrates a passive scanning optical pyrometer with an active shock wave velocity interferometer was designed in this study. The common-path lens was achromatic and designed in the range of 400 - 700 nm by using several types of radiation resistance optical materials. The mirrors of a Mach-Zehnder interferometer were motorized and could be controlled remotely, thereby simplifying the operation of the system. In addition, the system magnification could be altered by using different focal lengths with a streak camera coupling lens. The field of view of the combined system is 2 mm, and the magnification settings for the active velocity measuring system are $10\times, 20\times, \text{ and } 30\times$. The static interference fringes are straight, and their contrast is greater than 0.69. The system has a $4.72 \mu\text{m}$ spatial resolution. The system can be applied to dynamic measurement of shock velocity in a laser fusion device.

Key words: optical system design; velocity interferometer; Doppler shift; scanning optical pyrometer

1 引言

在惯性约束聚变(Inertial Confinement Fusion, ICF)研究中,任意反射表面速度干涉仪

(Velocity Interferometer System for Any Reflector, VISAR)^[1-2]和扫描光学高温计(Streaked Optical Pyrometer, SOP)^[3]是聚变靶场两个非常重要的诊断设备。VISAR是一种主动式聚变冲击

收稿日期:2020-07-15;修订日期:2020-09-19.

基金项目:国家重点研发计划资助项目(No. 2017YFA0403300)

波速度测量系统,它基于运动物体表面对探针光的多普勒频移效应进行测速。SOP是一种被动式冲击加热温度测量系统,它通过测量冲击波在台阶靶后表面卸载时的冲击加热发光信号,利用台阶靶的发光时间差计算冲击波速度,再利用冲击波速度和温度的定标关系求解冲击加热温度^[4]。

在国外,VISAR经过几十年的发展,已经被广泛应用于物质高压状态方程^[5]、材料特性^[6-8]、冲击特性瑞利-泰勒和脉冲整形^[9]等实验中,成为最重要的波剖面测试设备之一。美国Omega装置将VISAR和SOP集成在一起,发展了一种主、被一体的冲击波速度测量系统^[10],共用光路为卡塞格林集光系统,SOP的工作谱段为400~700 nm,但卡塞格林光路存在中心拦光问题。美国NIF装置也发展了一种主、被一体的测速系统,共用光路为全石英的透射式光路,受单一石英材料引入大量色散的影响,SOP的工作谱段仅为545~645 nm,但SOP的空间分辨率仅为150 μm ^[11-12];后来他们对SOP系统做了改进,分辨率

提升到12.5 μm ,但工作谱段没有展宽,为560~640 nm^[13]。

本文基于激光聚变装置设计了一种主、被动一体化的冲击波速度测量系统,采用多种耐辐射光学材料消色差设计,系统的工作谱段展宽至400~700 nm。采用自动化干涉仪设计,极大降低了系统运行、维护的复杂度。道威棱镜转像机构和放大倍率切换功能,使系统能够满足不同实验条件的需求。

2 光学系统设计

2.1 光路原理结构

主被动一体化冲击波速度测量系统的光路结构如图1所示。按功能光路划分为4个支路:公共支路、主动照明支路(A→B)、双灵敏度VISAR主动式测速支路(B→C,B→D)和被动式测速支路(B→E)。其中,系统靶点至M1之间的公共光路位于真空中,其余光路位于大气环境中,二者通过DIM真空窗实现分隔。

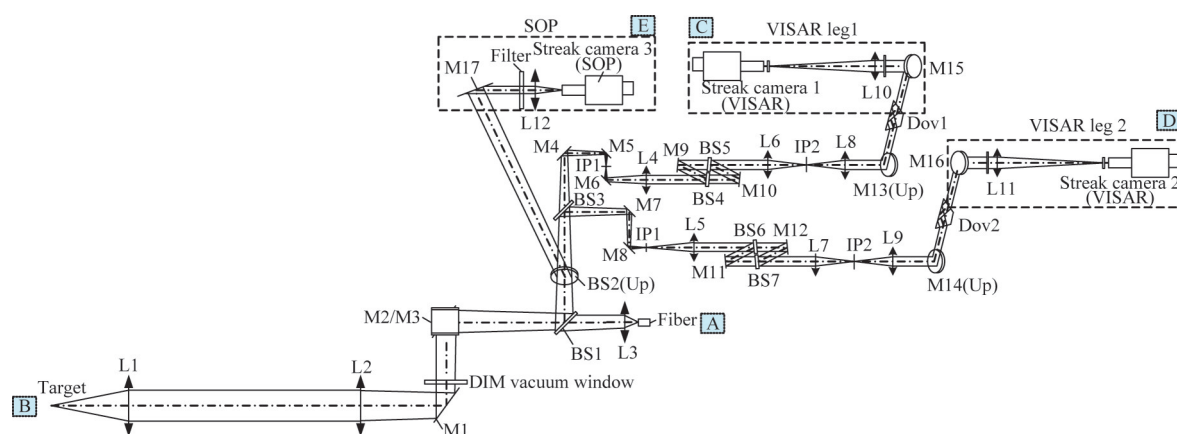


图1 主被动式冲击波速度测量系统的光路结构

Fig. 1 Optical schematic diagram of velocity interferometer system for any reflector and streaked optical pyrometer

2.2 光学设计

光学系统设计的输入主要有:主动照明探针的光波长为532 nm,主动式光路采用双灵敏度VISAR结构,放大倍率为10 \times ,20 \times ,30 \times 可选;被动式系统的工作谱段为400~700 nm,放大倍率为10 \times ;视场为2 mm;搭载平台(DIM)真空窗距离靶点4 m。

光学系统设计的核心问题之一是耐辐照设

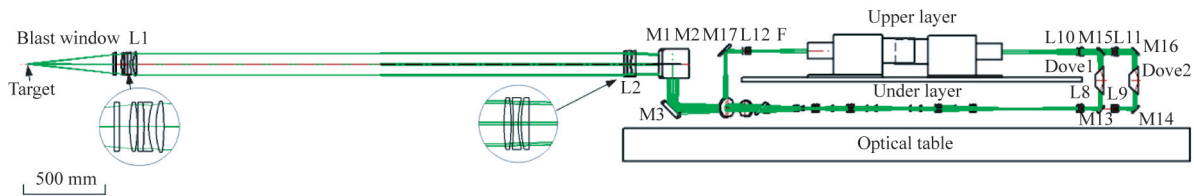
计,因为普通光学材料在该环境下被辐照而暗化,寿命很短。由于可获得的耐辐照光学玻璃种类有限,光学设计消色异常困难,如NIF装置的VISAR一次像面580 nm与640 nm之间的轴向色差高达43.18 cm(17 inch)。本系统采用了专门研制的耐辐照光学玻璃。

与之前的VISAR系统^[2]相比,本光学系统在光路中设置了道威棱镜,根据道威棱镜的光学特

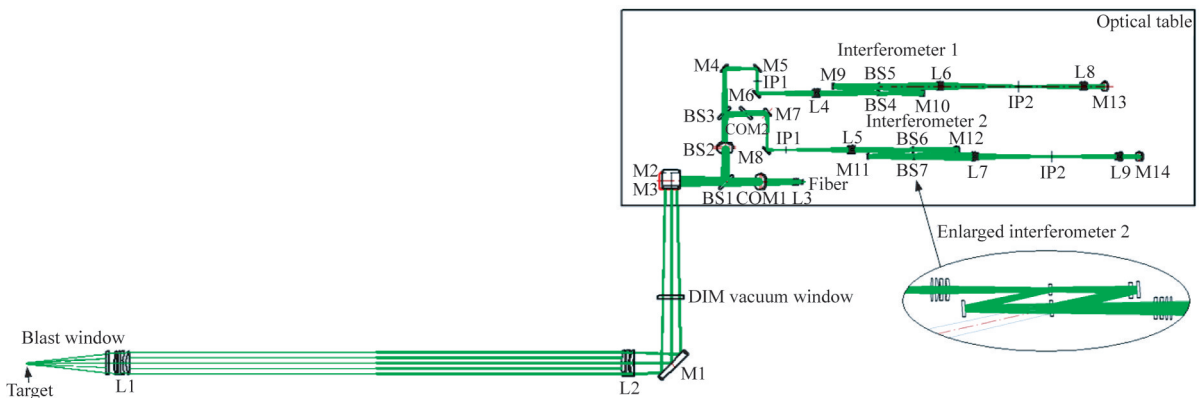
性,在像面探测器不变的情况下,道威棱镜绕自身光轴旋转 α 角时,探测器得到的物面旋转 2α 角。由于系统条纹相机狭缝获得的是靶面上某一条直线的像,如果实验需要改变待测线的方向,通过旋转道威棱镜即可。

为了在 VISAR 双支路中实现不同的放大倍率,本系统设计了不同焦距的 L10,L11。由于不同焦距镜头的后截距设计不同,为了在更换镜头时不影响其他光路,针对 3 种焦距镜头设计了不同的折叠光路,但它们具有相同的光束输入接口和相同的像面位置。

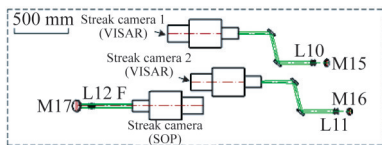
系统总体的光路设计结果如图 2 所示。L1 至 M1 位于真空环境中,后继光路位于光学平台上,光学平台光路又分为上下两层,VISAR 和 SOP 最终像面都位于上层;如图 2(b)所示,探针激光通过光纤输出,经过 L3,COM1 等光学元件照明靶点;由靶点返回的信号光依次经过 L1,L2 等器件到达 BS3,BS3 将信号分为两个支路,分别进入两个干涉仪;由靶点返回的 SOP 信号光依次经过 L1,L2 等器件到达 BS2,信号光被 BS2 反射,再经过 M17,L12 等器件进入 SOP 记录条纹相机。



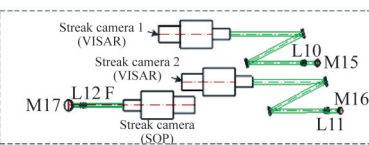
(a) 正视图
(a) Front view



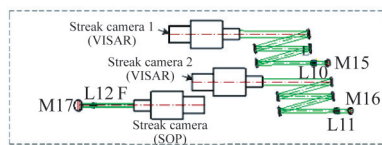
(b) 俯视图
(b) Top view



(c) 10×



(d) 20×



(e) 30×

图 2 干涉仪和高温计耦合系统光路

Fig. 2 Optical path of coupling system of velocity interferometer system for any reflector and streaked optical pyrometer

2. 2. 1 共用光路消色差设计

共用光路位于真空环境中,它既是主动照明探针光的光学通道,又是 VISAR 多普勒频移光

收集、SOP 信号光收集的光学通道。该光路设计的核心问题是耐辐照和消色差设计,由于采用了专门研制的耐辐照光学玻璃,共用光路实现了很

好的消色差设计。共用光路的设计结果如图 3 所示,它由 L1,L2 两组透镜组成,二者之间为平行光,便于光束的长距离传输。

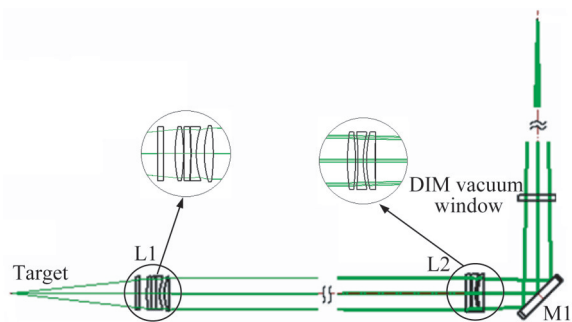


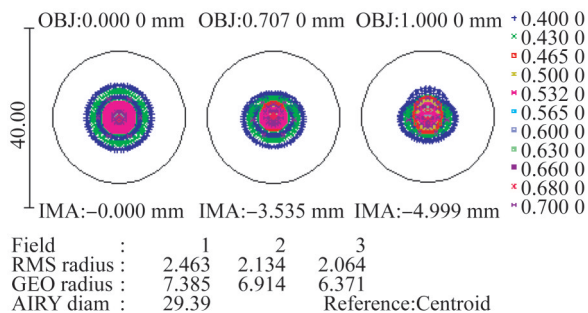
图 3 共用光路结构

Fig. 3 Layout of common path optical system

共用光路视场为 $\varphi 2 \text{ mm}$,工作谱段为 $400 \sim 700 \text{ nm}$,系统像质评价如图 4 所示。由图可见,像点的几何弥散斑小于艾利斑,系统在 $400 \sim 700 \text{ nm}$ 谱段内具有接近衍射极限的成像能力,像方传递函数在 20 lp/mm 处达到 0.7。

2.2.2 照明光路设计

照明光路是将光纤端面发出的光束通过共用光路投到靶点,照明目标面。由于光纤的数值孔径和共用光路的数值孔径不匹配,本系统采用匹配镜头 L3 实现二者的孔径匹配。由于采用的光纤是大芯径特殊光纤,光纤端面的光强分布比较均匀。靶点照明区域的照度分布如图 5 所示,可见照明光路具有比较均匀的目标照明效果。



(a) 5×成像系统点列图

(a) Spot diagram of 5× imaging system

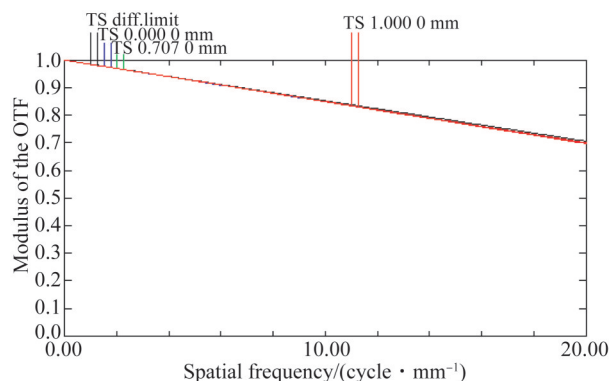
2.2.3 VISAR干涉光路设计

VISAR干涉光路是主动式干涉测速的核心。针对VISAR条纹丢失的问题,干涉光路采用具有不同速度灵敏度的双支路结构,二者联立有利于确立丢失条纹数量。系统采用等比分束镜将共用光路的光束一分为二,分别进入两个干涉仪。

在两个干涉支路中,干涉仪是核心的精密部件。在使用过程中,受自身稳定性和外界环境影响,干涉状态可能产生漂移,因此实验前必须进行状态确认,这大幅增加了系统操作的复杂性。本文设计了电动调节干涉仪,其结构如图 6 所示。干涉仪其中一臂的 M9 和 BS4 为二维电动可调元件,另一臂(BS5 和 M10)为基准臂。通过光路中干涉图像采集相机可以检查干涉仪的状态,并通过远程控制进行干涉仪的状态复位,大幅提升了系统的可操作性。

另外,本系统在 M13,M15 之间,以及 M14,M16 之间分别设计了道威棱镜。因系统最终像面处的条纹相机狭缝对应于物面上的一条直线,当道威棱镜绕其光轴旋转 ω 角时,物面上的待测直线旋转了 2ω 角。可见,通过道威棱镜的旋转可以方便地选取靶面上待测直线的方向。

最后,本系统设计了 3 种不同焦距的 L10 和 L11,使得双灵敏度 VISAR 系统具有 3 种不同的放大倍率。由于设计的 3 种焦距镜头的后截距不同,采用折叠反射镜对光路进行折叠(见图 2),使得 3 种焦距镜头具有相同的光束输入和像面位



(b) 5×成像系统传递函数

(b) Modulation transfer function of 5× imaging system

图 4 共用光路像质评价

Fig. 4 Evaluation of image quality of common path optical system

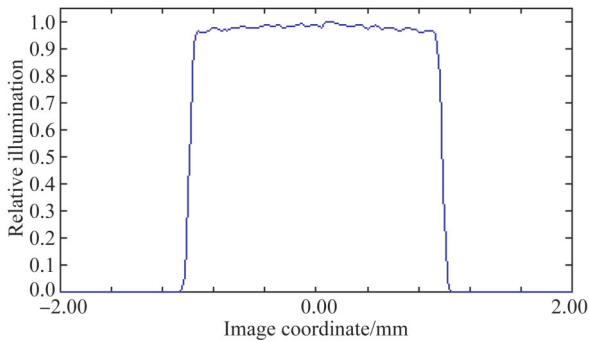


图 5 目标面的相对照度分布
Fig. 5 Relative illumination of target surface

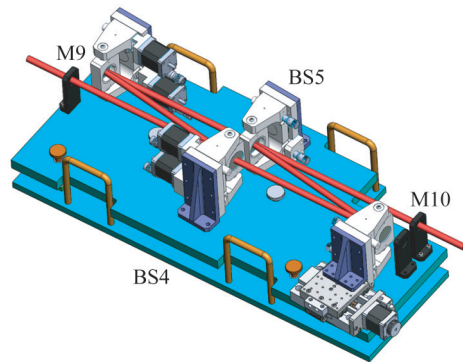
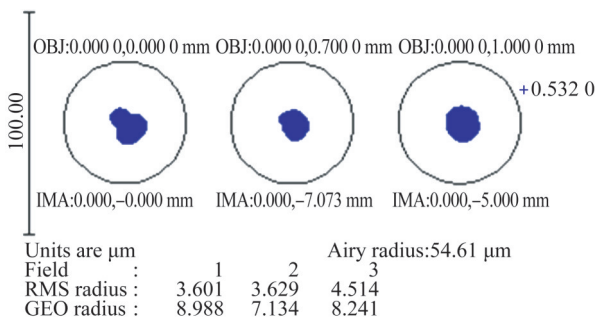


图 6 马赫-曾德尔干涉仪结构
Fig. 6 Structure of Mach-Zehnder interferometer

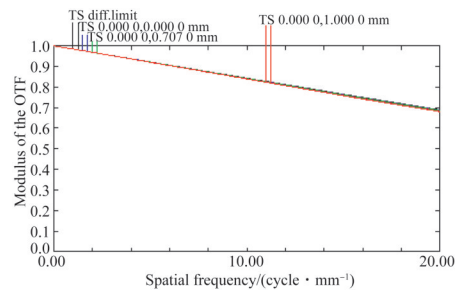
置。折叠反射镜和对应的镜头固化在一起,形成一个模块。倍率切换时,采取模块替换的方式,方便快捷。

干涉支路与共用光路构成一个完整的多普勒频移光差频干涉光路,采用 10×放大镜头,其光学像质评价如图 7 所示。其几何弥散斑小于衍射艾里斑,达到了衍射极限的成像质量,在 10 lp/

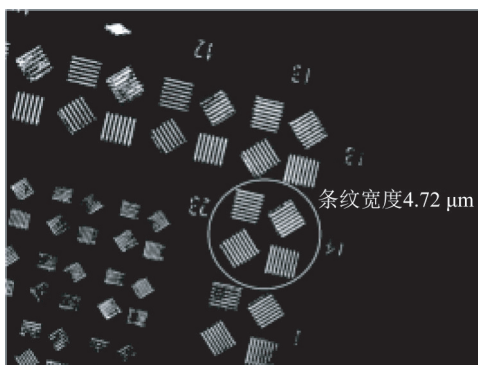
mm 处 MTF 达到 0.68。图 7(c)为对 1 号鉴别率板的成像结果,靶面上线宽为 4.72 μm 的一组条纹清晰可辨。7(d)为条纹相机狭缝处的静态干涉条纹,条纹调制度为 0.69。其他两种放大倍率下系统也具有同等的成像质量。



(a) 像点弥散斑
(a) Spot diagram



(b) 光学传递函数
(b) Optical transfer function



(c) 鉴别率板成像
(c) Target image on the streak camera slit



(d) 静态干涉条纹
(d) Static interference fringe

图 7 10×放大光学系统在 532 nm 处的像质评价

Fig. 7 Evaluation of image quality of VISAR optical system with magnification of 10×

2. 2. 4 SOP 光路设计

SOP 光路设计主要以共用光路为基础,开展条纹相机匹配及信号滤波设计,其光路结构如图 8 所示。从靶点发出的 SOP 信号光,依次经过 L1,L2 等器件到达分光镜 BS2,BS2 透射 532 nm 信号,将 400~700 nm 内的其余谱段信号反射到上层光路;将 SOP 信号分离出来并反射到上层光路;经上层的 M17 反射后,由滤片组 F 滤除

VISAR 信号光及打靶倍频光的干扰,经 L12 放大成像到条纹相机狭缝处;系统的放大倍率为 15×。系统的像质评价如图 9 所示,其中图 9(c) 为对 1 号鉴别率板的成像结果。由图可见,系统达到了衍射极限的分辨能力,像面传递函数在 6.67 lp/mm 处达到 0.79,物面宽度为 4.72 μm 的条纹成像清晰。

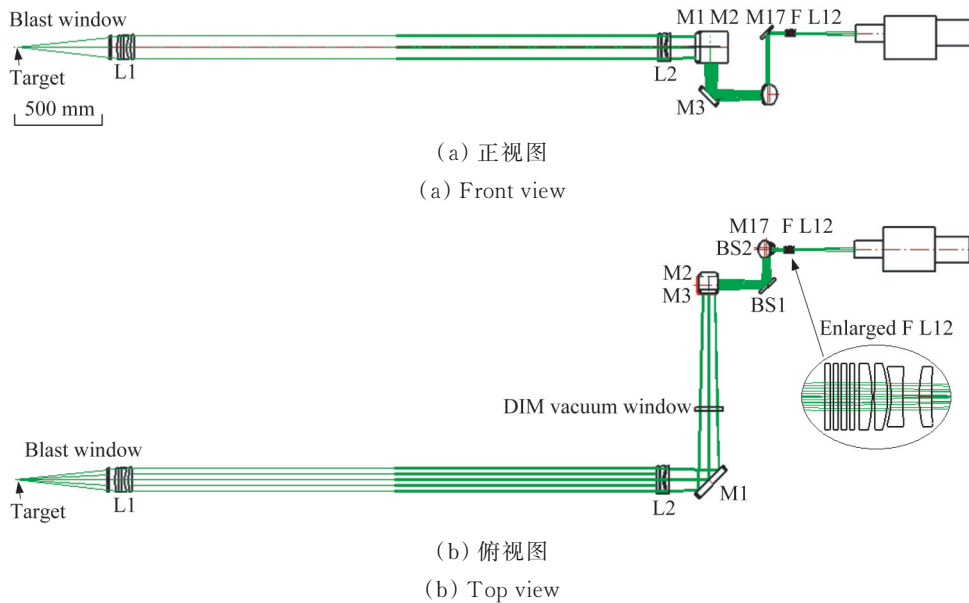


图 8 扫描光学高温计的光路结构

Fig. 8 Optical path of streaked optical pyrometer

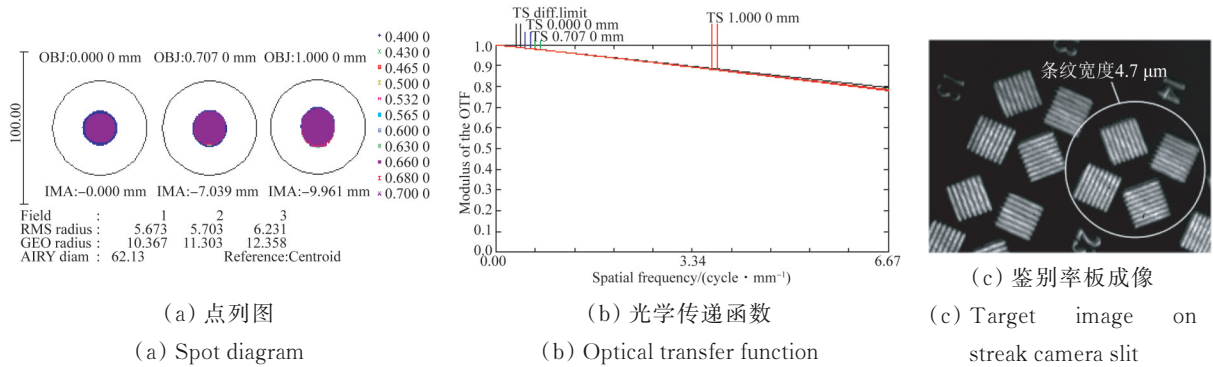


图 9 扫描光学高温计的像质评价

Fig. 9 Evaluation of image quality for streaked optical pyrometer

2. 2. 5 光学性能指标对比

本文设计的主被动冲击波速度测量系统与美国 NIF 装置主被动冲击波速度测量系统的主要性能如表 1 所示。由于 NIF 装置的环境辐射更

强,其更注重提升 VISAR 和 SOP 共光路的耐辐照能力,共光路没有消色差,为 SOP 带来了大量色差,限制了 SOP 的工作谱段宽度和物方分辨力;本系统基于国内应用环境的辐射情况,对共

光路进行了消色差设计,因此,SOP系统的工作谱段更宽、物方分辨力更好。

表 1 本冲击波速度测量系统性能与 NIF 冲击波速度测量系统的主要性能对比

Tab. 1 Performance comparison between proposed shock wave velocity measurement system and NIF

性能指标	NIF 装置	本系统
共光路消色差情况	660 nm,无消色差	400~700 nm 消色差
共光路耐辐照特性	最优	优
VISAR工作波长	659.5 nm	532 nm
VISAR物方分辨力	4.4 μm	4.72 μm
SOP工作谱段	545~645 nm	400~522 nm 和 542~700 nm
SOP物方分辨力	改造后 12.5 μm	4.72 μm

2.2.6 系统总体结构

系统的总体结构如图 10 所示,该系统可分为公共光路模块和光学平台模块两部分。公共光路模块工作在真空中,是探针光照明靶点、VISAR 信号光收集、SOP 信号光收集的公共通

道;光学平台模块分上下两层,下层主要有探针光发射、信号光分束、双支路 VISAR 的差频干涉等单元;上层主要是 VISAR、SOP 信号与条纹相机耦合单元。目前,该设备在激光聚变装置上运行稳定,并取得了大量的关键实验数据^[14]。

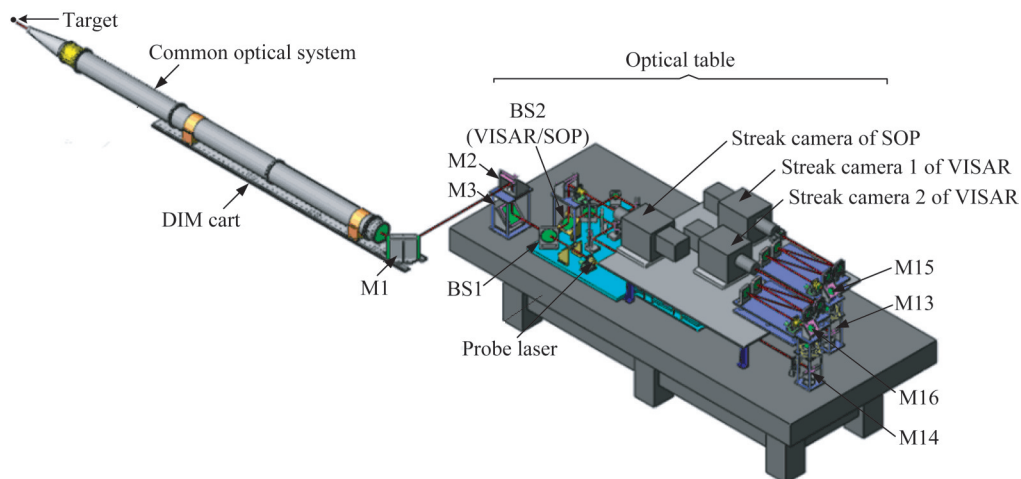


图 10 主被动式冲击波速度测量系统的总体结构

Fig. 10 Layout of velocity interferometer system for any reflector and streaked optical pyrometer

3 结 论

本文采用共用光路将 VISAR 和 SOP 集成于一体,一次实验可以获取两种数据^[10]。通过采用多种耐辐射玻璃,SOP 实现了宽光谱消色差、高分辨成像。VISAR 系统通过在光路中设置道威棱镜,可任意改变物面待测直线的方向,测试灵

活度大;不同放大倍率切换的功能,使系统对各种实验条件具有更高的适应能力。主被动系统均达到了物方 4.72 μm 的分辨能力,干涉系统的干涉条纹平直,调制度高。此外,还设计了电动干涉仪,大幅提升了系统的可操作性。该设备目前运行稳定,能够满足激光聚变冲击波速度测量的需求。

参考文献:

- [1] 闫亚东. 成像型双灵敏度 VISAR 关键技术研究 [D]. 北京:中国科学院研究生院,2008.
YAN Y D. *Key technical researches on double sensitivity imaging VISAR* [D]. Beijing: Graduate school of the Chinese Academy of Sciences, 2008. (in Chinese)
- [2] 闫亚东, 张法全, 何俊华, 等. 神光-III 原型装置用速度干涉仪的光学系统设计[J]. 光学精密工程, 2010, 18(11): 2355-2361.
YAN Y D, ZHANG F Q, HE J H, *et al.*. Design of VISAR optical system for Shen-Guang-III prototype[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, 18(11): 2355-2361. (in Chinese)
- [3] MILLER J E, BOEHLY T R, MELCHIOR A, *et al.*. Streaked optical pyrometer system for laser-driven shock-wave experiments on OMEGA [J]. *The Review of Scientific Instruments*, 2007, 78(3): 034903.
- [4] 闫亚东, 何俊华, 许瑞华, 等. 激光聚变冲击波被动式测速光学系统设计[J]. 光学精密工程, 2018, 26(11): 2662-2668.
YAN Y D, HE J H, XU R H, *et al.*. Optical system for passive laser fusion shock wave velocity measurement [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2018, 26(11): 2662-2668. (in Chinese)
- [5] GOLD D M, CELLIERS P M, COLLINS G W. Optical interferometry diagnostics in laser-driven equation of state experiments[C]. *AIP Conference Proceedings*. Snowbird: AIP, 2000: 1007-1010.
- [6] NARAYANA C, LUO H, ORLOFF J, *et al.*. Solid hydrogen at 342 GPa: no evidence for an alkali metal[J]. *Nature*, 1998, 393(6680): 46-49.
- [7] BENOIT M, MARX D, PARRINELLO M. Tunneling and zero-point motion in high-pressure ice [J]. *Nature*, 1998, 392(6673): 258-261.
- [8] LOBBAN C, FINNEY J L, KUHS W F. The structure of a new phase of ice[J]. *Nature*, 1998, 391(6664): 268-270.
- [9] MUNRO D H, CELLIERS P M, COLLINS G W, *et al.*. Shock timing technique for the National Ignition Facility [J]. *Physics of Plasmas*, 2001, 8(5): 2245-2250.
- [10] MALONE R M, BOWER J R, BRADLEY D K, *et al.*. Imaging VISAR diagnostic for the national ignition facility (NIF) [J]. *SPIE*, 2005, 5580: 505-516.
- [11] MALONE R M, FROGGET B C, KAUFMAN M I, *et al.*. Design of an imaging visar diagnostic for the national ignition facility (nif) [C]. *Current Developments in Lens Design and Optical Engineering IV*. San Diego: SPIE, 2003, 5173: 26-37.
- [12] MANUEL A M, MILLOT M, SEPPALA L G, *et al.*. Upgrades to the VISAR-streaked optical pyrometer (SOP) system on NIF [C]. *SPIE Optical Engineering+ Applications. Proc SPIE 9591, Target Diagnostics Physics and Engineering for Inertial Confinement Fusion IV*. San Diego: SPIE. 2015, 9591: 959104.
- [13] 王峰, 关赞洋, 理玉龙, 等. 基于神光III装置的光学诊断系统介绍[J]. 中国科学(物理学力学天文学), 2018, 48(6): 48-58.
WANG F, GUAN Z Y, LI Y L, *et al.*. Optical diagnostic systems based on Shenguang III [J]. *Scientia Sinica Physica, Mechanica & Astronomica*, 2018, 48(6): 48-58. (in Chinese)

作者简介:



闫亚东(1979—),男,河南周口人,研究员,2003年于郑州大学获得学士学位,2008年于西安光学精密机械研究所获得博士学位,主要从事激光聚变物理参数诊断技术方面的研究。E-mail:yyd@opt.ac.cn

通讯作者:



韦明智(1979—),男,甘肃兰州人,工程师,2002年于天津大学获得学士学位,主要从事激光聚变物理参数诊断技术方面的研究。E-mail:weimingzhi@163.com