

文章编号: 0253-2239(2009)11-3207-05

# 成像型任意反射面速度干涉仪研制

彭晓世 王 峰 刘慎业 蒋小华

(中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

**摘要** 成像型任意反射面速度干涉仪是激光驱动冲击波研究的重要诊断设备, 主要应用于惯性约束聚变脉冲整形实验、高压状态方程实验研究和材料特性研究。基于传统任意反射面速度干涉仪的特点, 研制了一台基于神光 III 原型装置的成像型任意反射面速度干涉仪, 该系统可用于测量自由面速度及透明介质中的冲击波速度。给出了成像型任意反射面速度干涉仪的详细设计要点。对系统性能进行了分析及测试, 结果表明时间分辨优于 30 ps, 物方空间分辨约为 10  $\mu\text{m}$ , 测速范围为 6~45 km/s。

**关键词** 光学器件; 任意反射面速度干涉仪; 冲击波; 多普勒频移; 光混频技术

**中图分类号** TN206 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092911.3207

## Development of an Imaging Velocity Interferometer System for Any Reflector

Peng Xiaoshi Wang Feng Liu Shenye Jiang Xiaohua

(Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China)

**Abstract** Imaging velocity interferometer system for any reflector (VISAR) is an important diagnostic tool for a variety of experiments involving laser-driven shock-wave propagation, including pulse shaping tool experiments for inertial confinement fusion research, high-pressure state equation experiments and materials characterization experiments. On the basis of conventional VISAR, an imaging VISAR has been implemented at the shenguang-III prototype. Making use of the imaging VISAR, velocity of free surface and shock wave traveling through transparent media can be measured. The key points in designing an imaging VISAR are described in detail. Analyzing and testing the capability of the imaging VISAR indicate that the instrument's temporal resolution is 30 ps, spatial resolution about 10  $\mu\text{m}$ , and velocity can be measured over the range from 6~45 km/s.

**Key words** optical devices; velocity interferometer system for any reflector (VISAR); shock wave; Doppler shift; optical mixing technique

### 1 引 言

惯性约束聚变(ICF)实验研究中,为了最大限度地降低冲击压缩时熵增,使压缩过程接近等熵过程,要求对打靶激光进行脉冲整形。脉冲整形时需根据冲击波速度、冲击波会聚时间等参数进行实验表征。目前,国内用于激光驱动冲击波诊断的主要设备是由卡塞格伦(Cassegrain)望远镜、光学条纹相机和记录 CCD 组成的扫描光学高温计,通过测量不透明样品后表面冲击波卸载时的冲击加热发光信

号的产生时间对冲击波速度进行测量<sup>[1]</sup>。对于惯性约束聚变靶丸常用的玻璃、液氖和 CH 材料等透明介质,利用扫描光学高温计无法进行冲击波测量,因此需要发展一种新的诊断设备。

20 世纪 90 年代, P M Celliers 等<sup>[2]</sup>报道了在任意反射面速度干涉仪(Velocity interferometer system for any reflector, VISAR)中引入成像系统后得到的成像型 VISAR。利用光学多普勒效应和光混频技术,通过光混频技术追踪频率变化过程从

收稿日期: 2009-01-08; 收到修改稿日期: 2009-02-16

基金项目: 国家自然科学基金(10805041)资助课题。

作者简介: 彭晓世(1981—),男,硕士,助理研究员,主要从事惯性约束聚变物理诊断及设等方面的研究。

E-mail: xiaoshi1025@sohu.com

而求得表面速度变化过程。对于透明介质,当介质中的冲击波压力足够高时,冲击波后的介质将被液化而变得不透明,冲击波阵面成为一个反射面,而冲击波前的物质仍是透明的。因此,成像型 VISAR 可通过测量冲击波阵面来实现对透明介质中的冲击波速度测量<sup>[3,4]</sup>。本文报道了新研制的成像型 VISAR,给出了详细的设计要点,对成像型 VISAR 的性能作了较全面的分析。并利用神光Ⅲ原型装置对系统进行了静态测试,结果表明,该系统具有较高的条纹对比度,时间分辨优于 30 ps,物方空间分辨优于 10  $\mu\text{m}$ 。

## 2 VISAR 测速原理

VISAR 干涉测试技术是基于光学多普勒效应和混频技术而建立起来的连续测量运动界面速度的一种精密测试技术。图 1 是传统 VISAR 示意图。

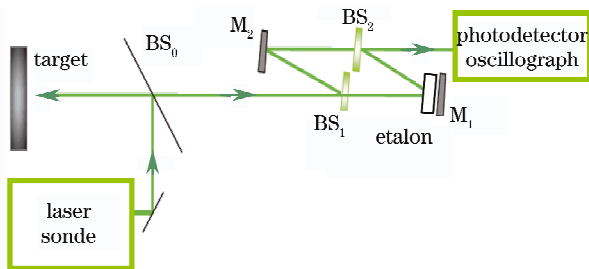


图 1 传统 VISAR 示意图

Fig. 1 Schematic diagram of conventional VISAR

频率为  $\nu_0$  的探针光入射到以速度  $u(t)$  运动的待测面上,由于多普勒效应,从待测面反射回来的光信号频率变为  $\nu(t)$ 。反射光与入射光频率之差称为多普勒频移  $\Delta\nu$ ,它携带了待测面的速度信息,多普勒频移  $\Delta\nu$  为

$$\Delta\nu = \nu(t) - \nu_0 = 2u(t)\nu_0/c = 2u(t)/\lambda, \quad (1)$$

式中  $\lambda$  为探针光波长。由图 1 可见,携带多普勒信息的反射光由分束镜  $BS_1$  分成两束,其中一束进入标准具后经反射镜  $M_1$  反射,另一束则不经过标准具,直接被  $M_2$  反射。当这两束激光通过分束器  $BS_2$  后将发生拍频相干,形成明暗相间的干涉环纹。将环纹中心引入光电倍增管,利用示波器进行记录,在待测面速度发生变化时,环纹中心的强度将产生正弦变化。可以证明<sup>[5]</sup>,在  $t$  时刻产生的正弦波数(或称为条纹数)  $N(t)$  与待测面运动速度  $u(t)$  之间的关系可表示为

$$u(t - \tau/2) = N(t)F_v/(1 + \delta), \quad (2)$$

式中  $F_v = \lambda/2\tau$  称为 VISAR 的条纹常数,它表示单位条纹变化所对应的速度改变量,也称为 VISAR 的

速度灵敏度, $\tau$  为标准具的延迟时间, $\delta$  为标准具材料的色散修正因子。为了满足时间相干性的要求,探针光的相干长度  $L_0$  应满足  $L_0 \geq \tau$ 。

传统 VISAR 利用光电倍增管和示波器进行记录,只能对待测面上的一点或多点进行测量。为了获得具有空间分辨的待测面速度信息,将成像系统耦合到传统 VISAR 中组成了成像型 VISAR,其通过像面传递将待测面成像在记录面上,并采用条纹相机进行记录。

与传统 VISAR 将环纹中心引入光电倍增管进行记录不同,在利用成像型 VISAR 进行速度测量时,通过有意调节使干涉仪两支路间有微小夹角。此时干涉环会逐渐变成直线条纹族,相当于环纹中心很远,曲率半径很大的一系列圆条纹。当待测面速度发生加速或减速变化时,由于光强的正弦变化,远场的这些直线族相对于它们的中心将会向外或向内移动。将移动的条纹数  $N(t)$  代入(2)式即可求得待测面速度。

## 3 成像型 VISAR 研制

### 3.1 系统光路排布

本文研制的成像型 VISAR 的详细光路排布如图 2 所示。系统整个工作过程为:从光纤发出的探针光依次经过透镜  $L_{11}$ ,补偿镜  $COM_1$ ,分束镜  $BS_1$ ,反射镜  $M_2$  和  $M_1$ ,真空窗口玻璃,透镜  $L_2$  和  $L_1$ ,保护玻璃到达靶点(TCC)。其中,透镜  $L_{11}$  用于将光纤端面成像于透镜  $L_2$  的焦面上,透镜  $L_1, L_2$  组成的前置组则将光纤端面再次成像于靶点。由靶点反射的光由  $L_1$  收集并准直,然后依次经过  $L_2$ ,窗口玻璃、 $M_1, M_2, BS_1$  到达  $BS_2$ 。 $BS_1$  为 1:1 分束镜,同时用于探测光的输入和收集,此处将损失大部分探针光能量。 $BS_2$  也为 1:1 分束镜,用于将光束分为相互垂直的两部分,分别进入系统的两个支路。在上面的支路中,反射镜  $M_3$  和  $M_4$  组成一个灵活的调

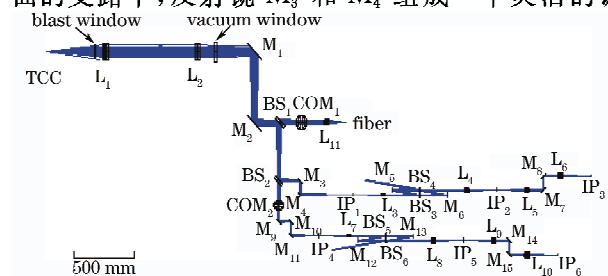


图 2 成像型 VISAR 光路排布

Fig. 2 Details of the image relay system of imaging VISAR

整机构,可以方便调节入射光的光轴。 $IP_1$  为一次像面,透镜  $L_3$  的焦平面与  $IP_1$  重合,可将入射光变为平行光后进入由反射镜  $M_5, M_6$ , 分束镜  $BS_3, BS_4$  组成的干涉仪(标准具没有在图中标出)。 $BS_3$  将信号光等分为两部分。其中一部分光通过标准具而使得两束光之间产生延时。两束光分别经  $M_5, M_6$  反射后在  $BS_4$  处汇合,混频后进入透镜  $L_4$ 。 $L_4$  将从干涉仪出来的干涉光成像于二次像面  $IP_2$ 。透镜  $L_5, L_6$  为中继透镜,光路在二者之间为平行光,可在此加装干涉滤光片以消除靶场干扰光。 $IP_3$  为最终像面,在  $IP_3$  得到的干涉图通过条纹相机进行记录。 $M_7, M_8$  为调整机构,以便于将信号光调到条纹相机狭缝上。在另一支路中,由于会聚光路中存在倾斜  $45^\circ$  的平板分束镜,改变了原来的光束结构,给系统带来像散,因此加装了一个补偿镜  $COM_2$ 。考虑到靶场的空间限制,支路而还通过一片反射镜  $M_9$  将垂直摆放的两个支路变为平行摆放, $M_{10}, M_{11}$  为调整机构,后面的光路除标准具厚度不同外,其余与上支路类似。

### 3.2 系统设计要点

#### 3.2.1 探针光源

在采集高速信号时,为使光能量满足条纹相机光电响应,要求使用的激光器为脉冲激光器,峰值功率大于 10 kW。为避免打靶激光对测量的干扰,要求激光器输出波长偏离打靶激光。为减小激光光强变化对记录结果的影响,要求激光脉冲平滑。激光驱动冲击波诊断的时间尺度为几纳秒,为使探测光与打靶激光同步,要求激光器提供外触发工作方式,触发晃动小于 4 ns。为避免触发晃动对记录的影响,且有足够记录长度,要求脉冲宽度大于 10 ns。由于 VISAR 速度分辨本领受激光器线宽限制,为保证测速精度,要求激光器输出为单纵模。为适应于精密的干涉测量,要求激光器具有较好的光强稳定度、较小的发散角及  $TEM_{00}$  模。

#### 3.2.2 成像系统

成像系统主要用于将靶点收集的信号光送入干涉系统,并最终成像于记录面。本系统采用了前置透镜组进行收光,可以在不增大光学元件尺寸的前提下提高系统的收光效率。由于不同角度的回波产生的多普勒频移不同,进入成像系统的光不是只有正向回波,而是一个光锥。在这种情况下,可认为多普勒频移具有一定的带宽。为减小由于带宽引入的测量误差,要求用  $f$  数较大的前置透镜来收集回波

信号。但随着  $f$  数增大,成像系统的收光效率将下降,因此在选择系统的  $f$  数时应同时衡量两方面的影响。为便于成像系统的调节,安装在靶室上的成像组件应采用指向与径向调节分离的方案,同时做气密性设计。

为了避免激光打靶时产生的碎片损坏前置透镜,实验时可将平板玻璃作为试验的损耗件,因此在成像系统中应设计一套便于更换平板玻璃的机械结构。由于成像系统处于靶室内,X 射线较强,为防止光学玻璃长时间受 X 射线辐射后变暗,要求光学玻璃采用熔石英玻璃。

为便于用白光对干涉仪进行零程差调试,要求干涉仪前后的透镜以及中继镜组采用消色差设计。干涉仪中的反射镜采用铝镜。为减小光学元件的因安装夹持和自重导致的变形,要求系统所有光学元件均适当加厚。

由于系统光路折转均采用直角形式,使系统元件摆放较为规整,但是光路中倾斜  $45^\circ$  放置的分束板将引入较大的像散,因此要求光路中必须以空间  $45^\circ$  再放置一个等厚平板补偿分束板的像散。

为适应不同实验场地的不同安装位置,便于将收光系统的光轴调在放置干涉仪的平台上,应采用两块转折反射镜  $M_1, M_2$  组成一个灵活而实用的调节机构。在进入干涉仪和记录条纹相机前也应采用类似的结构。

#### 3.2.3 干涉系统

为了避免在干涉仪的两支路中由于光学元件面形精度导致的波像差降低条纹对比度,要求干涉仪系统中的反射镜、分束镜和标准具的表面不平整度小于  $\lambda/20$ 。

为满足干涉系统两支路光程差为零的条件,需引入相干长度很短的白光进行调节。由于白光相干长度为波长量级,因此要求调节机构步长为几微米。成像型 VISAR 用于正式测量时,要求使干涉仪两支路满足模拟零程差条件,模拟零程差位置一般通过计算获得,因此为减小测量误差,要求对厚度、折射率和夹角进行测量,测量误差小于 0.4%。

在双光束干涉时,通过调节可得到垂直于相机狭缝方向的干涉条纹,在探测面速度有变化的情况下,将产生平行于狭缝方向移动并携带差拍信号的干涉图样。为便于调节干涉条纹方向和相机狭缝上记录的条纹数。要求干涉仪中的反射镜调节旋钮采用微分螺旋头。

## 4 系统性能

### 4.1 时空分辨率

成像型 VISAR 的时间分辨率受干涉仪两支路的相对延迟时间和记录系统的时间分辨限制。本系统利用条纹相机进行记录,时间分辨为皮秒量级,因此系统的时间分辨主要取决于标准具的延迟时间  $\tau$ 。系统中标准具厚度为 4 mm,折射率为 1.45847,通过标准具延迟时间计算公式<sup>[6]</sup>可知  $\tau$  约为 20 ps。考虑条纹相机时间分辨,成像型 VISAR 的时间分辨优于 30 ps。

利用分辨率板对系统的空间分辨能力进行了测量。分辨率板第 9 单元的线宽度为  $3.15 \mu\text{m}$ ,长度为  $37.5 \mu\text{m}$ ,在挡住干涉仪的一个支路后利用 CCD 记录的分辨率板像如图 3 所示。由图 3 可知系统的物方分辨优于  $7 \mu\text{m}$ ,考虑到实验测量时系统的时间分辨受到靶姿态、探针光照均匀性等因素的影响,系统的实际物方分辨优于  $10 \mu\text{m}$ 。

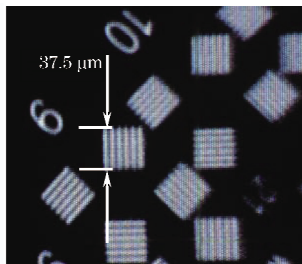


图 3 分辨率板像

Fig. 3 The image of the spatial resolution board

### 4.2 速度灵敏度

在 VISAR 测速中,选择合适的速度灵敏度至关重要。本系统中探针光波长为 532 nm,标准具材料为熔石英,其折射率为 1.45847,有 3, 4, 7, 10 和 18 mm 五种厚度可选。根据 VISAR 的速度灵敏度计算公式  $F_v = \lambda/2\tau$  可知系统的速度灵敏度分别为: 17.2, 12.9, 7.37, 5.16 和 2.87 ( $\text{km/s} \cdot \text{fringe}^{-1}$ )。一般情况下,进行双灵敏度测试时,对应不同灵敏度的支路,条纹相机狭缝分别记录 2.5~3 个条纹和 6~8 个条纹移动<sup>[7]</sup>。因此本系统的主要测速范围为 6~45 km/s。

### 4.3 模拟零程差

成像型 VISAR 光学路径长,光学元件多,视场范围小,因此系统调试难度较大。干涉仪模拟零程差调节是成像型 VISAR 调试中的一大难点,因此对本系统的模拟零程差调节性能进行了检验。

模拟零程差调节时分为两个过程进行。首先利用白光进行零程差调试,由于白光相干长度很短,得

到白光干涉条纹后可认为干涉仪两支路满足零程差条件。图 4 为利用冷光源输出光纤端面作为物面得到的白光干涉条纹(物面为 0.5 mm 的光纤阵列,放大倍数为 16)。通过计算可知,完成零程差调试后,将反射镜沿法向向后移动  $d[d = h(1 - 1/n), h$  为标准具厚度,  $n$  为标准具折射率] 即可实现模拟零程差调节。

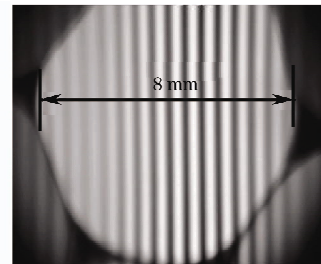


图 4 白光干涉条纹图

Fig. 4 Interference pattern produce by white light

## 5 系统测试

在神光 III 原型激光装置上,对新研制的成像型 VISAR 其进行了测试。在无打靶激光入射,只有探针光入射台阶样品表面时,利用条纹相机记录的扫描像如图 5 所示。由图 5 可知,新研制的成像型 VISAR 具有较高条纹对比度和时空分辨能力。扫描图中时间方向上的强度变化与探针光强度变化一致。条纹粗细不均匀是因为照明光不均匀所致。扫描图中无探针光反射的区域可能是因为两台阶的交界面角度大于系统收光立体角所致。

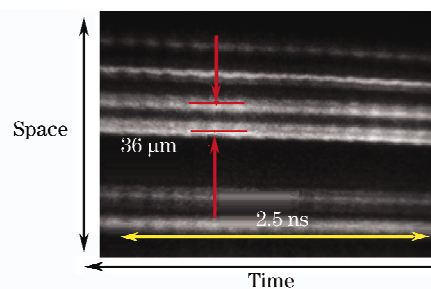


图 5 打靶前条纹测试像

Fig. 5 A test image of the stationary fringe pattern prior to one shot

利用 8 束三倍频激光打靶对  $\text{Al}_2\text{O}_3$  中的冲击波进行了测量。激光能量约为  $8 \times 500 \text{ J}$ ,脉宽为 1 ns,条纹相机记录的扫描像如图 6 所示。从图 6 中可以观察到清晰的干涉条纹和条纹的移动以及探针光在透明介质  $\text{Al}_2\text{O}_3$  中冲击波阵面的反射。表明该系统可用于测量透明介质中的冲击波速度。

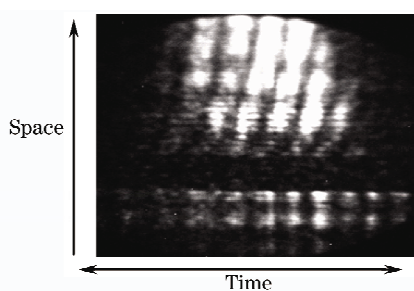


图 6 冲击波诊断时的扫描条纹像

Fig. 6 The dynamic fringe pattern of shock waves diagnosis

## 6 结 论

为实现透明介质中冲击波速度测量,对脉冲整形实验进行实验表征,研制出了一台基于神光Ⅲ原型激光装置的成像型 VISAR。本文给出了系统的总体技术方案及详细设计要点。对系统时空分辨的分析及动态测试的结果表明:系统具有较高的条纹对比度,时间分辨优于 30 ps,物方空间分辨约为 10  $\mu\text{m}$ ,测速范围为 6~45 km/s,可用于测量自由面速度及透明介质中的冲击波速度。但动态测试的结果也表明有一些新的具体技术问题有待进一步考察和研究,例如,调整并稳定探针光单纵模特性以减弱

光强在时间方向上的调制、改善探针光照明均匀性以提高条纹对比度及降低对记录系统动态范围的要求等等。

## 参 考 文 献

- 1 Jiang Shaoen, Li Wenhong, Sun Kexi *et al.*. Shock wave driven by X-ray radiation from cylindrical hohlraum on Shenguang II laser[J]. *Acta Physica Sinica*, 2004, **53**(10): 3424~3427  
江少恩,李文洪,蒋小华等.神光Ⅱ上柱形黑腔辐射驱动冲击波[J]. *物理学报*, 2004, **53**(10): 3424~3427
- 2 P. M. Celliers, G. W. Collins, L. B. Da Silva *et al.*. Accurate measurement of laser-driven shock trajectories with velocity interferometry [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1998, **73** (10): 1320~1322
- 3 D. H. Munro, P. M. Celliers, G. W. Collins *et al.*. Shock timing technique for the National Ignition Facility [J]. *Phys. Plasmas*, 2001, **8**(5): 2245~2250
- 4 P. M. Celliers, G. W. Collins, L. B. Da Silva *et al.*. Shock-induced transformation of liquid Deuterium into a metallic fluid [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2000, **84**(24): 5564~5567
- 5 L. M. Barker, R. E. Hollenbach. Laser Interferometer for measuring high velocities of any reflecting surface [J]. *J. Appl. Phys.*, 1972, **43**(11): 4669~4675
- 6 Hu Shaolou. *Laser Interferometry Technique for Measuring Velocity* [M]. Beijing National Defence Industry Press, 2001, 32~33  
胡绍楼. *激光干涉测量技术* [M]. 北京:国防工业出版社, 2001, 32~33
- 7 P. M. Celliers, D. K. Bradley, G. W. Collins *et al.*. Line-imaging velocimeter for shock diagnostics at the OMEGA laser facility [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 2004, **75**(11): 4916~4929