

# 全光纤白光任意反射面速度干涉系统\*

胡 力 贾 波 叶昆诊

(电子科技大学“宽带光纤传输与信息系统技术”国家重点实验室, 成都 610054)

谭 华 周显明 李雪梅 胡昌民

(中国工程物理研究院流体物理研究所冲击波物理与爆轰物理实验室, 成都 610003)

**摘 要** 对离散任意反射面速度干涉系统和全光纤白光任意反射面速度干涉系统(FVISAR)作了较全面的分析, 论证了全光纤任意反射面速度干涉系统的主要意义在于实现了理想的空相干、等程干涉、以及方便灵活的延时设置和极低的系统损耗。给出了详细的设计要点, 报道了所研制的低激光二极管功率实验系统。以该系统进行了霍布金森杆一维应力加载下的自由面速度测试。实验结果与阻抗匹配法计算结果吻合很好, 并获得了加载减载过程中产生的自由面速度振荡分布。

**关键词** 光纤, 多普勒效应, 干涉, 定向耦合器, 霍布金森杆。

## 1 引 言

高速、非接触的瞬态测速是冲击波和爆轰物理实验研究的重要内容, 采用的主要测量技术是“任意反射面速度干涉系统”, 简称 VISAR。其基本原理由 Barker<sup>[1]</sup>于70年代初提出。传统的任意反射面速度干涉系统使用高相干的大功率气体激光器(相干长度为米的量级, 输出功率为瓦的量级), 由数十个精密加工镀膜的透镜、棱镜及其支架等离散光学元件组成光路, 可称为离散任意反射面速度干涉系统。该设备体积庞大、维护繁难、价格昂贵、调试操作专业性强, 极大地限制了使用范围。

随着光纤技术及相关光电子器件的发展, 80年代后期开始了全光纤干涉测速技术的研究, 近年 Levin 等提出了不等臂光纤延迟线实验方案<sup>[2]</sup>, 并给出了用于动态测速的实验结果。由于数理基础与离散任意反射面速度干涉系统相同而可称为全光纤白光任意反射面速度干涉系统, 简称 FVISAR。

本文简要回顾了离散任意反射面速度干涉系统的工作原理, 从任意反射面速度干涉系统的数理意义出发阐明了全光纤白光任意反射面速度干涉系统的光路结构、重要优势、设计考虑要点; 并指出, 采用光纤光路所带来的实质性改善是从根本上解决了离散任意反射面速度干涉系统中的空相干性问题, 也即是最初提出任意反射面速度干涉系统所希望解决的问

\* 中国工程物理研究院科学基金资助课题。

收稿日期: 1998-12-07; 收到修改稿日期: 1999-04-26

题,同时也方便地实现了等程干涉而可使用极短相干光源、甚至白光光源;报道了全光纤白光任意反射面速度干涉系统的实验研制,模拟实验,以及用于霍布金森杆一维应力加载条件下铝样品的自由速度实测结果。

## 2 任意反射面速度干涉系统原理

Sandia 干涉测速原理如图1所示,分光板 SP<sub>2</sub>处参与拍频相干的是运动面分别在时刻  $t$  和  $t - \tau$  反射的两波阵面,其多普勒频率  $f(t)$  和  $f(t - \tau)$  相应于运动速度  $v(t)$  和  $v(t - \tau)$ ,拍频相干光强为<sup>[3]</sup>:

$$I = I_1 + I_2 + 2 \sqrt{I_1 I_2} \cos [2\pi \int \dot{F}(t) dt], \quad (1)$$

其中

$$F(t) = \frac{2}{\lambda} [v(t) - v(t - \tau)] \approx \frac{2}{\lambda} \tau a(t - \tau/2), \quad (2)$$

积分(2)式得到速度干涉仪方程:

$$N(t) = \frac{2}{\lambda} \int_{t-\tau}^t v(t) dt \approx \frac{2\tau}{\lambda} v(t - \frac{\tau}{2}), \quad (3)$$

式中  $2\tau/\lambda$  称为速度干涉条纹指数,  $N(t)$  为 0 到  $t$  时刻内发生的条纹总数,并有  $v(t \leq 0) \equiv 0$ 。延时光路的设置使干涉条纹频率正比于  $\tau$  前后的相对运动速度差,极大地扩展了测量动态范围,但对光源提出了更高的要求。如果最大被测速度为  $v_{\max}$ ,要求光源相干长度  $L_c$  满足:

$$L_c > (c + v_{\max})\tau = c\tau, \quad (4)$$

式中  $c\tau$  被称为“空程”或“闲程”,因此是一个不等臂干涉系统。虽然现代气体激光器的相干长度已可满足上式要求,但不等臂干涉系统中两光束传输的空间距离不等,从而到达 SP<sub>2</sub>处的空间相干性不同,或者说两光束波阵面场振幅分布不等,由(1)式将不能得到高的干涉对比度。为此, Barker 进一步引进放大接受角的技术并提出了任意反射面速度干涉系统。其主要思想是在延时光路中介入高折射率媒质以使两光束在 SP<sub>2</sub>处有相同的空间相干性。

已有文献从光束发散的角度推导介入媒质与延时差的关系<sup>[4]</sup>,本文从光源的相干面积出发导出相同结论。图2中,经 SP<sub>1</sub>分成的两光束分别被镜面 M<sub>1</sub>和 M<sub>2</sub>反射后回到 SP<sub>1</sub>相干。两光束在 A 处对光源有相同空间相干面积  $A_s$ ,将其视为新的光源面积,则两臂在 M<sub>1</sub>和 M<sub>2</sub>处的相干面积分别为:

$$A_{c1} = \frac{\lambda^2 h^2}{n^2 A_s}, \quad A_{c2} = \frac{\lambda^2 R^2}{n_0^2 A_s}, \quad (5)$$

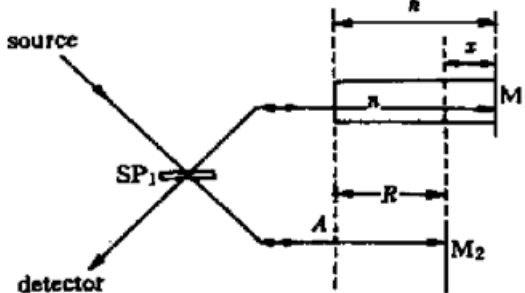


Fig. 2 The compensation for interference area in conventional VISAR

$n$ 为媒质折射率,  $n_0 = 1$ 。由  $A_{c1} = A_{c2}$  易导出两光束空间长度差与延时差:

$$x = h(1 - \frac{1}{n}), \quad \tau = \frac{2h}{c}(n - \frac{1}{n}). \quad (6)$$

如果将这里的  $\tau$  取作(2)式和(3)式中的延时,则既提供了延迟,又保持了两光束相同的空间相干性。即便在入射光强很低或被测面漫反射条件下也可能获得近100%的干涉对比度。

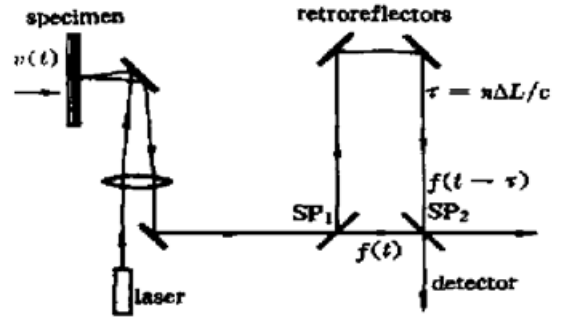


Fig. 1 Sandia velocity interferometer

高折射媒质的制作及调测需要高精度工艺和专业技术,相应的 $\tau$ 值难以大于3~5 ns。此外,测试系统对光束偏振态、获得判别加减速运动的正交相干信号、附加直流校正以及用于系统调整的驱动装置等的要求使得离散任意反射面速度干涉系统的技术内容非常复杂。

### 3 全光纤白光任意反射面速度干涉系统

全光纤白光任意反射面速度干涉系统的光路布置如图3,由单模光纤组成光路。半导体激光器的相干长度 $L_c$ 一般为毫米量级;光纤隔离器IS阻止光反向输入激光器; $C_1$ 和 $C_2$ 为分光比为1:1的 $2 \times 2$ 全光纤定向耦合器,作用相当于分光板;SF为准直用自聚焦微透镜。光纤延时臂与直通臂的长度差为 $\Delta L$ ,一般有 $\Delta L \gg L_c$ ;近似取光纤媒质折射率为 $n = 1.5$ ,两臂间延时差为:

$$\tau = \frac{1.5\Delta L}{c} \quad (7)$$

如果被测面M静止,反射回 $C_1$ 右端的四部分光的相对延时为: $p_{111}$ 延时为 $2\tau$ , $p_{112}$ 延时为 $\tau$ , $p_{211}$ 延时为 $\tau$ , $p_{212}$ 延时为0。其中 $p_{112}$ 与 $p_{211}$ 因静态光程差为零而可在 $C_1$ 处拍频相干。前者是到达被测面之前获得的延时 $\tau$ ,后者是离开被测面后获得延时 $\tau$ 。

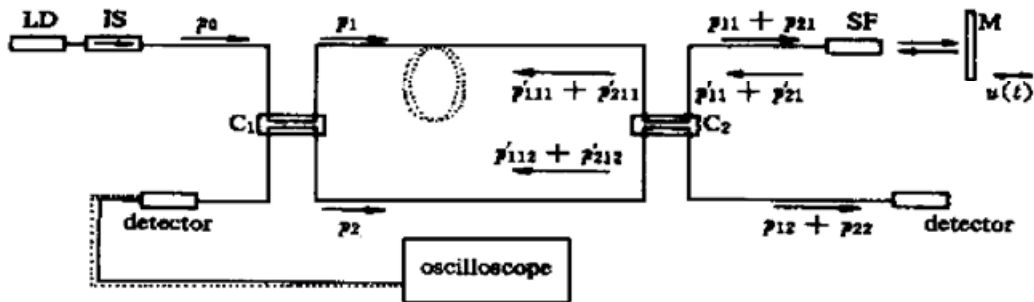


Fig. 3 Schematic diagram of an optical fiber VISAR

如果被测面运动,由于 $p_{11}$ 滞后于 $p_{21}$ 时隙 $\tau$ 从SF出射, $p_{112}$ 和 $p_{211}$ 的多普勒频率 $f(t)$ 和 $f(t - \tau)$ 分别与运动速度 $v(t)$ 和 $v(t - \tau)$ 对应,速度干涉仪方程(2)、(3)式依然成立。但由于静态光程完全对称,仅要求光源的相干长度 $L_c$ 满足:

$$L_c > v_{\max} \tau \quad (8)$$

全光纤白光任意反射面速度干涉系统的重要意义首先在于光纤中的导波光始终具有稳定相同的模场分布而简单地实现了完全的空间相干,使用较低的光源功率也可能获得较高的干涉对比度。这已被以下实验所证实。其二是完全消除了“闲程”,实现了等程干涉。比较(4)式、(8)式可以看到光源的相干长度得到了最充分地利用。(8)式表明,对于极短 $L_c$ 的光源,只要设置足够小的 $\tau$ 值即可测量足够高的运动速度。因而理论上可以使用白光源并可称作全光纤白光任意反射面速度干涉系统。

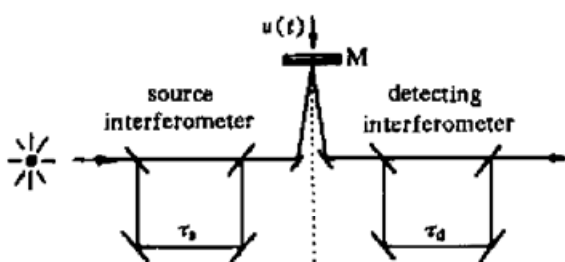


Fig. 4 Schematic of white light velocimeter

事实上,在离散光路中也可以消除闲程实现极短 $L_c$ 光源的等程相干,即为David等人报道的白光干涉实验<sup>[5]</sup>。其光路原理如图4所示。显然,离散系统的延时设置、光路损耗、动态范围等都受到局限。但如果以光纤代替空间光路,以光纤定向耦合器代替分光板,并置 $\tau_s = \tau_d$ ,再按虚线将光源干涉部分和

检测干涉部分左右对称重叠，则图 4 演化为图 3 的全光纤白光任意反射面速度干涉系统。

全光纤白光任意反射面速度干涉系统完全摒除了离散光学元件。等程干涉对所设置的任何  $\tau$  值均成立，在高速测试中具有明显的发展优势。

任意反射面速度干涉系统的数据处理技术是基于两路有相位差的干涉光强输出，由此可以判别被测面的运动方向，并将系统的直流漂移影响降至最低以获取高测量精度。在图 3 的全光纤白光任意反射面速度干涉系统中，全光纤  $2 \times 2$  耦合器  $C_1$  两端口的输出干涉光强相位差为  $180^\circ$ ，因此不能给出两输出间的相位领先关系。但改用全对称的  $3 \times 3$  定向耦合器则可以提供相位差为  $120^\circ$  的三路干涉光强输出，这时的输入兼输出光路如图 5 所示。来自光源的输入光将被平均耦合到延时臂、直通臂和光源监测光路  $P_{mor}$ 。反向输入光的模场振幅分别为  $a_{1in} = \exp [i2\pi f(t - \tau)t]$ 、 $a_{2in} = \exp [i2\pi f(t)t]$ 、 $a_{3in} = 0$ ，由耦合理论可得反向输出干涉光强为

$$\begin{aligned}
 P_{1out}(\theta) &= \frac{2}{3} [1 + \cos(\theta - 2\pi/3)], \\
 P_{2out}(\theta) &= \frac{2}{3} [1 + \cos(\theta + 2\pi/3)], \\
 P_{3out}(\theta) &= \frac{2}{3} (1 + \cos \theta), \\
 \theta &= 2\pi[f(t) - f(t - \tau)]t.
 \end{aligned}
 \tag{9}$$

这相当于在各输出光强之间设置了  $120^\circ$  的固定相位偏置，如图 6 所示。被测面速度方向的改变意味着  $\theta$  符号改变，由输出光强间的相位领先关系即可判别被测速度方向。

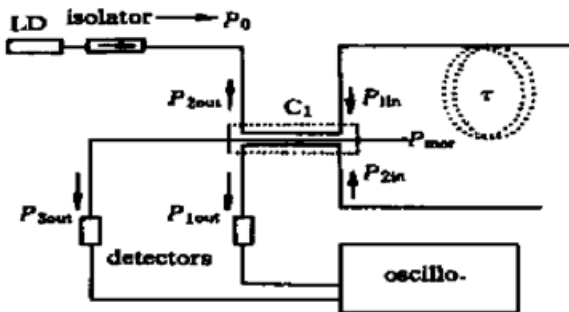


Fig. 5 The input and output schematic using  $3 \times 3$  coupler in FVISAR

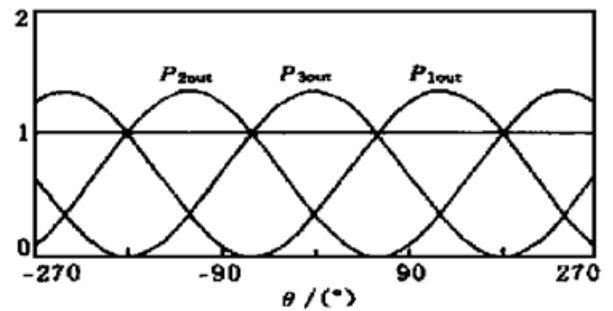


Fig. 6 Three  $120^\circ$  out of phase interference signals from the  $3 \times 3$  coupler of FVISAR

全光纤白光任意反射面速度干涉系统中延时  $\tau$  的设置和变更非常方便，因而可用于每秒数米到数百米的测速范围。选择  $\tau$  值的主要依据是速度干涉仪方程以及对测量结果的预期估计，主要考虑点为：

- 1) 按(8)式估算  $\tau$  的取值上限；
- 2) 由(2)式和(3)式，选用较大的  $\tau$  值可获得较多的  $N(t)$  和  $F(t)$  数，有利于提高数据处理精度；
- 3) 数据处理所得结果是时隙  $\tau$  内的平均值， $\tau$  值太大将不能反映速度的精细分布；
- 4)  $F(t)$  是光电探测及处理电路带宽设计的主要依据，过高的  $F(t)$  意味着高成本。

作为估算基础的  $v_{max}$ 、 $v(t)$  和  $a(t)$  可由被测运动原理或经验提供，事实上  $\tau$  值的选取有着很宽的自由度。

探测器光功率中有  $1/2$  的直流分量，最大干涉对比度为  $50\%$ 。采用全对称  $2 \times 2$  或  $3 \times 3$

耦合器时, 不考虑光路、器件、空间耦合等损耗, 光源功率转换为信号功率的最高利用效率分别为  $1/8$  和  $1/9$ , 而离散系统的光源利用率一般不大于  $1\%$ 。

#### 4 全光纤白光任意反射面速度干涉系统的动态测试实验

在本文研制的全光纤白光任意反射面速度干涉系统中, 激光二极管光波长  $1.31 \mu\text{m}$ ,  $\Delta\lambda \approx 5 \text{ nm}$ ,  $L_c \approx 0.34 \text{ mm}$ , 输出功率低于  $0.5 \text{ mW}$ , 比文献[2]低一个量级以上; 光电探测器灵敏度低于  $100 \text{ nW}$ , 带宽约  $40 \text{ MHz}$ ; 以熔锥工艺研制的  $2 \times 2$  和  $3 \times 3$  定向耦合器<sup>[7]</sup> 插入损耗小于  $0.2 \text{ dB}$ , 反向隔离度高于  $-50 \text{ dB}$ 、偏振度低于  $0.2 \text{ dB}$ 。

在喇叭纸盆上粘贴镜面作为图4中的M, 在示波器上可清晰地演示(2)式, (3)式的干涉条纹与被测速度关系。镜面位移为  $S(t) = A \sin \omega t$ , 振动  $f = \omega/2\pi \approx 200 \text{ Hz}$ 。延迟光纤  $\Delta L = 1450 \text{ m}$ 、 $\tau = 7.25 \mu\text{s}$ 。图7(a)为  $2 \times 2$  耦合器输出的两路  $180^\circ$  相位差电流波形, 其中一路是在返回隔离器之前引出; 图7(b)为  $3 \times 3$  耦合器两端口输出的  $120^\circ$  相位差波形。稀疏条纹对应于镜面在  $\omega t = m\pi$  附近的运动、稠密条纹则对应于  $\omega t = (m - 1/2)\pi$  附近的运动( $m$  为正整数)。未对光纤两正交基模偏振态作特殊调整, 干涉对比度达到了  $30\%$  以上, 输出波形稳定。

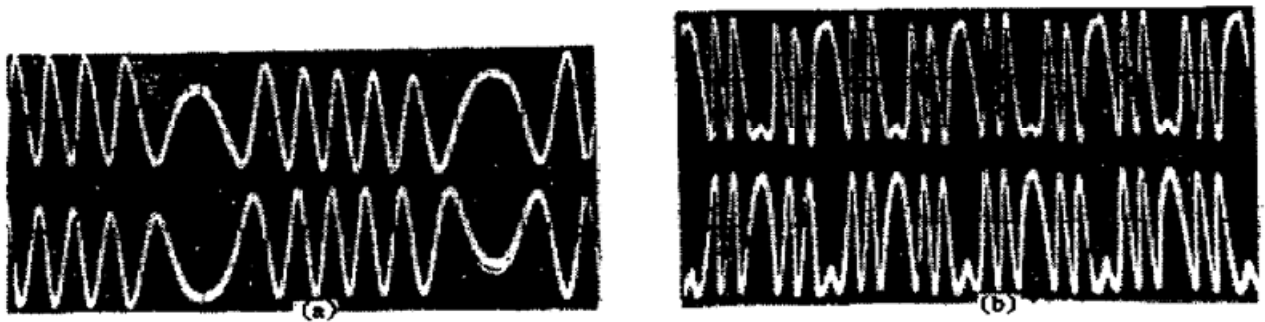


Fig. 7 Interference signals from the harmonic speaker move recorded by FVISAR. (a) The out from  $2 \times 2$  coupler, (b) The out from  $3 \times 3$  coupler

利用霍布金森杆 (Hopkinson Bar) 对 LY<sub>12</sub> 铝样品产生一维应力波加载的实验测速装置如图8所示。

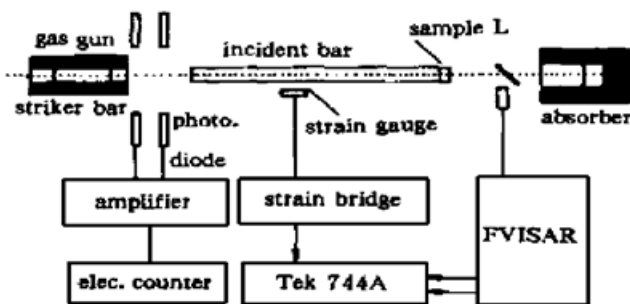


Fig. 8 The Hopkinson Bar system using FVISAR

图8所示。粘贴于入射杆一端的铝样品(组分的质量比为:  $3.8\% \sim 4.9\% \text{ Cu}$ ,  $1.2\% \sim 1.8\% \text{ Mg}$ ,  $0.3\% \sim 0.9\% \text{ Mn}$ ,  $0.3\% \text{ Zn}$ , 其余为铝) 尺寸为  $\phi 14 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$ , 自由表面被研磨成漫反射, 比文献[2]的镜面精度约低3个量级。撞击杆与入射杆由同种钢质材料制成, 其速度由侧面的光电计数器测量。当撞击杆撞击入射杆时, 在入射杆中传入线弹性波, 线弹性波传输到入射杆/样品界面时将向样品中传入压缩波, 同时反射卸载波。

样品中的压缩波到达自由面时又向样品内反射一束中心稀疏波, 同时引起样品的自由面运动。

上述波的传播过程及样品自由面的运动速度可以用阻抗匹配法计算。若钢的弹性纵波声速为  $c_1$ 、铝的弹性纵波声速为  $c_2$ , 则铝样品的自由面速度为:

$$v_{fs} = \frac{2\rho_{01}c_1}{\rho_{01}c_1 + \rho_{02}c_2} W, \quad (10)$$

式中  $\rho_{01} = 7.80$  和  $\rho_{02} = 2.78$  分别为钢和铝的密度,  $W$  为撞击杆速度。另外, 由于铝样品中的

弹性波在样品自由面及钢质入射杆/样品界面间来回反射, 将引起自由面速度的振荡。

霍布金森杆实验中样品自由面运动速度一般仅为每秒数米至数十米, 从(2)式或(3)式可以看到, 采用任意反射面速度干涉系统技术测量时必须设置较大的  $\tau$  值才能获得足够多的干涉条纹数。这对于离散任意反射面速度干涉系统来说是相当困难甚至不可能的(例如本实验中所设置的  $\tau = 125 \sim 250 \text{ ns}$ )。

以所研制的全光纤白光任意反射面速度干涉系统测量了不同撞击杆速度下的样品自由面速度。使用了图5的  $3 \times 3$  耦合器光路布置, 激光二极管输出功率小于  $100 \mu\text{W}$ 。由测得的干涉光电流波形经数据处理后所得的自由表面速度、以及按(10)式计算的结果同列于表1, 二者相符很好。由于是非接触的瞬态测量, 测量过程持续时间仅微秒量级, 环境因素对光纤系统的稳定性几乎没有影响。

Table 1. Free-surface velocities of LY<sub>12</sub> aluminum samples for different striker bar speed

striker bar speed ( $W$ ) /(m/s)	delay fiber ( $\Delta L$ ) /m	free surface velocity/(m/s)	
		mearsured by FVISAR	calculated by impedance match
9.0	50	12.7	$12.5 \pm 0.1$
13.4	50	19.0	$18.7 \pm 0.1$
18.4	50	26.3	$25.6 \pm 0.3$
20.0	25	28.0	$27.9 \pm 0.5$

图9给出了一组典型的干涉光电流波形, 图10为数据处理所得的相应速度分布。可以看到, 采用全光纤白光任意反射面速度干涉系统测量获得了清晰的自由面速度振荡性态。详细的力学过程拟另文讨论。

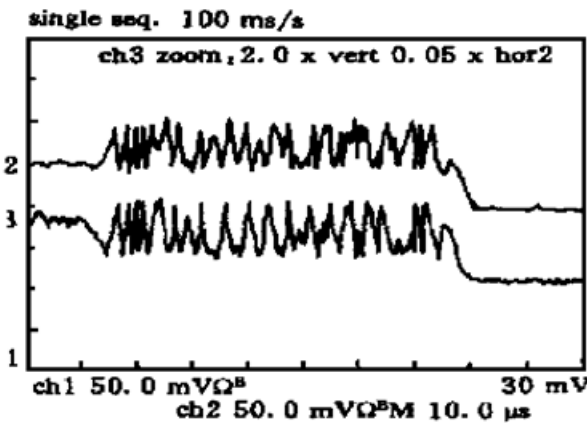


Fig. 9 Interference signals recorded during the moving of sample free-surface ( $W = 9 \text{ m/s}$ )

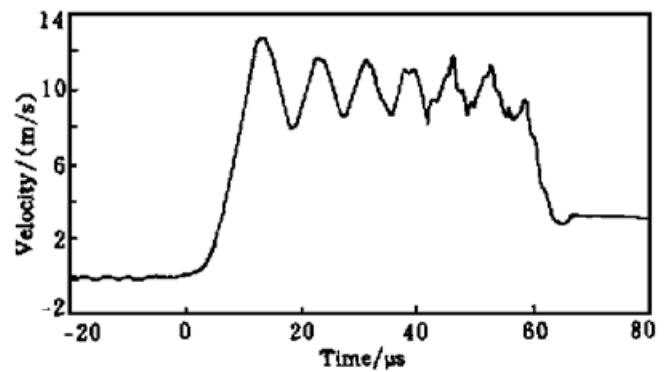


Fig. 10 Free surface velocity calculated from the interference signals in Fig. 9

**结束语** 理论和实验表明, 全光纤白光任意反射面速度干涉系统因实现了完全的空间相干而易于得到较高的干涉对比度; 因实现了等程干涉而允许使用极短相干光源; 因延时  $\tau$  的设置方便而可用于很宽的测速范围。此外, 低损耗光纤代替了离散空间光路, 大大降低了传输损耗; 半导体激光器件代替了气体激光源, 半导体探测器代替了真空光电倍增管, 大幅度简化了测试系统、降低了测量成本、提高了系统的可操作性, 表现出很好的实用前景。但伴随光纤的应用也出现一些新的具体技术问题有待进一步考察和研究, 例如, 调整并稳定单模光纤

两正交基模场的偏振态以进一步提高干涉对比度、输出信号相位差的精确设置、系统调整时辅助信号的引入等等。

### 参 考 文 献

- [1] Barker, Hollenbach R E. Laser interferometer for measuring high velocities of any reflecting surface. *J. Appl. Phys.*, 1972, **43**(11) : 4669~ 4675
- [2] Levin L, Tzach D, Shamir J. Fiber optical velocity interferometer with very short coherence length light source. *Rev. Sci. Instrum.*, 1996, **67**(4) : 1434~ 1437
- [3] Born M, Wolf E. *Principles of Optics*, New York: Oxford, 1980.
- [4] Zwick H H, Shepherd G G. Defocusing a wide-angle Michelson interferometer. *J. Appl. Opt.*, 1971, **10**(11) : 2569~ 2571
- [5] Erskine D J, Holmes N C. White-light velocimetry. *Nature*, 1995, **377**(28) : 317~ 320
- [6] Snyder A W, Love J D. *Optical Waveguide Theory*, London and New York: O Chapman and Hall, 1983, Ch. 18, 29
- [7] Hu Li, Luo Xiaobing, Lin Weigan. The coupling coefficient and spectrum of single-mode fiber fused biconical couplers. *The Third Japan-China Joint Meeting on Optical Fiber Science and Electro-Magnetic Theory*, Fukuoka: Institute of Electrical Engineers of Japan, 1990, EMT-90-119

## All-Fiber White-Light Velocity Interferometric System of any Reflector

Hu Li      Jia Bo      Ye Kunzheng

(National Key Laboratory of Optical Fiber Communications,  
University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054)

Tan Hua      Zhou Xianming      Lie Xuemei      Hu Changmin

(Laboratory for Shock Wave and Detonation Physics Research, Institute of Fluid Physics, Chengdu 610003)

(Received 7 December 1998; revised 26 April 1999)

**Abstract** A new velocity interferometer system called all-fiber white-light velocity interferometric system of any reflector (FVISAR) is demonstrated. The important developments of the FVISAR are discussed, such as the perfect space-interference property and the potential to work with very short coherence length light source even if white-light, in comparison with the conventional velocity interferometric system of any reflector (VISAR) which consists of complicated discrete optical elements. The key points in designing a FVISAR are described in detail, and an experimental FVISAR system with very low source power is reported.

Preliminary tests to the FVISAR were conducted using the Hopkinson Bar system. Results show that the observed free-surface velocities of LY<sub>12</sub> aluminum samples were in good agreement with theoretical estimations by impedance match. The oscillations of the free surface velocity of the LY<sub>12</sub> aluminum samples during the loading and unloading processes can be detected and observed clearly, which results from the wave reflections between the free surface and the steel bar/sample interface.

**Key words** optical fiber, Doppler effect, interferometer, directive coupler, Hopkinson bar.