

# 共焦 Fabry-Perot 干涉仪超声接收系统 聚光本领分析\*

何存富

(南京航空航天大学测试工程系知能所 南京 210016)

周辛庚

(清华大学 北京 100084)

**提要** 在自行研制的共焦 Fabry-Perot 干涉仪超声波接收系统的基础上,详细地分析了该系统的聚光本领;给出了干涉仪聚光本领、物空间聚光本领及其二者的匹配条件;并给出在前述匹配条件下获得的实验结果。

**关键词** Fabry-Perot 干涉仪, 超声波接收器, 聚光本领

## 1 引 言

非接触式超声波检测技术种类较多,但远距离的非接触式技术只能采用光学检测技术。非干涉的刀口技术要求样品表面非常光洁,难以用于粗糙表面。而采用干涉技术的位移干涉仪(如零差和外差干涉仪),对光点尺寸又有限制,只有光点尺寸达到一个散斑大小时,才能达到最大灵敏度。采用共焦 Fabry-Perot 干涉仪(简称 CFPI)作为超声接收器,它对样品表面的速度敏感,对周围环境的振动不敏感,而且可同时接收多个散射光斑,有较强的聚光本领。但是,欲充分发挥 CFPI 聚光本领强这一特点,还需解决它与物空间的匹配问题。否则有可能使干涉仪的聚光本领不能充分发挥,影响系统的探测灵敏度;或者有可能接收透镜选择太大,增加了系统成本。本文在自行研制的 CFPI 系统的基础上,着重分析了干涉仪、物空间的聚光本领及其二者的匹配条件,并给出在此匹配条件下利用干涉仪探测系统得到的实验结果。

## 2 CFPI 超声接收系统及其工作原理

CFPI 超声接收系统是一集光、声、电等为一体的精密测试系统,其示意图如图 1 所示。该系统的工作原理实质上是一信号调制与解调的过程。经分光镜 BS 分束后的激光束 2 经偏振反光镜  $PBS_1$  全反到被测物体表面,其散射光被在物体内传播的超声波信号(由激光脉冲产生)引起的 Doppler 频移所调制;经透镜  $L$  汇集后第二次通过四分之一波片,其偏振方向旋转  $\pi/2$ 。之后,全部通过  $PBS_1$  和  $PBS_2$ ,再经过 CFPI 解调后透过  $PBS_3$  至光电管  $PD_2$ 。由于此信号为被解调了的超声信号,它为一随物体表面速度变化的光强信号,经放大和滤波后显示在存储示波器上。而光束 1 以及反馈控制环是为稳定干涉仪的工作点而专门设置的。

\* 国家自然科学基金资助项目。

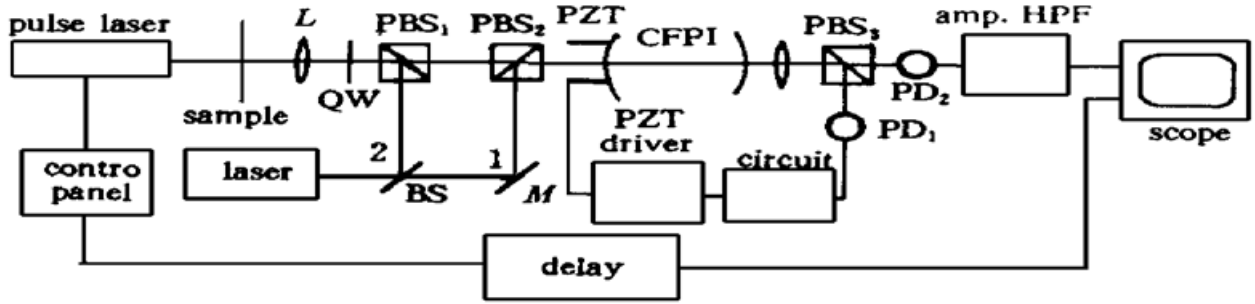


图1 Fabry-Perot 干涉仪超声波接收系统示意图

Fig.1 Experimental set-up of an ultrasonic receiver with a confocal Fabry-Perot interferometer

CFPI 是由两个曲率半径相等、镀有高反膜层的球面镜共焦放置而成。当一束光近轴入射到干涉仪内时,在忽略球差情况下,其透射光强<sup>[1]</sup>

$$I = \frac{(1-R)^2}{1+R^4-2R^2\cos\frac{8\pi r\nu}{c}} I_i \quad (1)$$

其中,  $R$  为镜面反射系数,  $r$  为腔长,  $c$  为光速,  $\nu$  为光频,  $I_i$  为干涉仪的入射光强。

将 CFPI 干涉仪作为超声接收器时,干涉仪的工作点必须稳定在透射峰值的半高度附近。此时,入射光频的微小变化可导致输出光强的很大变化。假设样品内传播的超声波使得样品表面产生微小位移

$$\delta(t) = U\cos(2\pi f_u t + \varphi) \quad (2)$$

则透射光强可以表示成<sup>[2]</sup>

$$I = I_0 \{ 1 + (4\pi U/\lambda) S(f_u) \cos[2\pi f_u t + \varphi + \mathcal{Q}(f_u)] \} \quad (3)$$

这里,  $S(f_u)$  和  $\mathcal{Q}(f_u)$  分别为输出光强对超声波频率的幅度响应和相位响应。 $I_0 \propto I_i$  为位移等于零时的透射光强。

这里 CFPI 作为一频率-光强转换器(也作选频器)起的是信号解调作用。

### 3 CFPI 超声接收系统的聚光本领分析

从(1)和(3)式可以看出,要获得最佳探测灵敏度,入射到 CFPI 的光强 ( $I_i$ ) 越大越好。但实际上利用 CFPI 作为超声接收器所探测的样品绝大多数都是散射面,而非镜面。对于这样的散射面,入射到 CFPI 的散射光是很微弱的。这样,在激光器的功率一定时,系统就存在一聚集散射光的本领问题。CFPI 较其它类型的干涉仪(如平面 FP 干涉仪及 Michelson 干涉仪)有较强的聚光本领。但将其用于散射面的信号检测,还需与物空间的聚光本领相匹配。

#### 3.1 干涉仪聚光本领

作为一光谱仪器,CFPI 干涉仪的聚光本领与光谱分辨率两者相互依赖,两者乘积为一与腔长有关的常数 ( $4\pi^2 r^2$ )。如图 2 所示,将干涉仪中央平面上的干涉条纹成像到一小孔光阑,且只让中心干涉级通过小孔,而被其后的光电探测器接收。当小孔的孔径趋于无穷小时,由于较小的中心区有极大的径向色散,此时的光谱分辨率达到极限值,其聚光本领趋于无穷小。当该孔径张大到  $\rho_s = (r^3 \lambda / F)^{1/4}$  时<sup>[1]</sup> ( $F$  为干涉仪的精细度),光谱分辨率降低到其极限值的 70%。此时小孔后面探测器接收的立体角为  $\Omega = \pi \rho_s^2 / r^2$ ,干涉仪的聚光本领

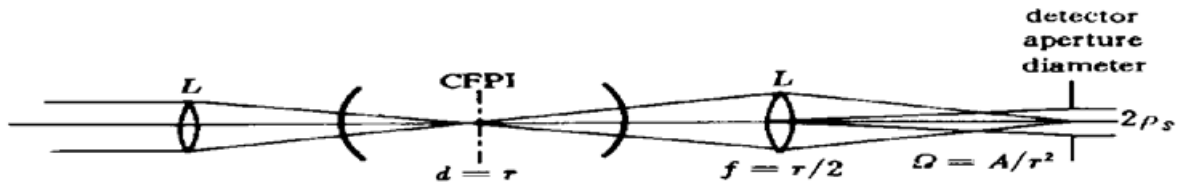


图 2 CFPI 聚光本领示意图

Fig.2 Optical layout showing the etendue of CFPI

$$E = A \Omega = (\pi \rho_s^2) (\pi \rho_s^2 / r^2) = \pi^2 r \lambda / F \tag{4}$$

这里,  $\rho_s$  的数值也为两球面镜中心区域的半径<sup>[1,3]</sup>, 在此区域内相交的光线才能保证干涉仪的光谱分辨率不再降低。

在精细度  $F$  一定的情况下, 聚光本领  $E$  将随镜间距  $d (= r)$  的增大而增加, 而光谱分辨率 ( $R = 4rF/\lambda$ ) 也同时随着  $r$  增大而提高。两者的乘积

$$E \cdot R = 0.7(4\pi^2 r^2) \tag{5}$$

为与  $r$  有关的常数。其中, 系数 0.7 是考虑了实际分辨率降低到极限分辨率的 70% 而引进的。这说明可以通过增大  $r$  来提高 CFPI 的聚光本领。

本文研制的 CFPI, 其  $r = 0.302 \text{ m}$ ,  $F = 51.7$ ,  $E \approx 3.6 \times 10^{-2} \text{ mm} \cdot \text{sr}$ 。

### 3.2 物空间聚光本领

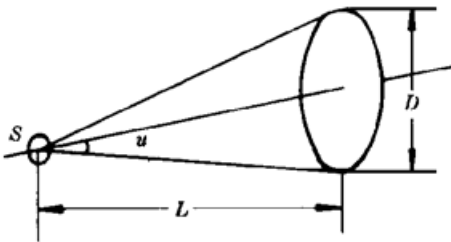


图 3 物空间聚光本领示意图

Fig.3 Schematic of the etendue in the object space

物空间的聚光本领是以物镜(聚光镜)聚集光通量的能力来量度。当光源(即样品被照射点, 其面积为  $S$ ) 距离干涉仪较近时, 如图 3 所示, 物空间的聚光本领

$$E_w = \pi \sin^2 u \cdot S = S \cdot \frac{\pi}{4} (D/L)^2 \tag{6}$$

其中,  $u$  为系统入射光瞳对  $S$  所张的孔径角;  $D$  为入射光瞳的直径;  $L$  为入射光瞳距光源  $S$  的距离。若要提高聚光本领, 则要求有大的孔径角。如物离入射光瞳很近, 入射光瞳的半径必须很大。

### 3.3 两者匹配条件

布置光路如图 4 所示, 置透镜于合适位置, 使得  $S$  于 CFPI 的中心相共轭。如前所述, 为确保干涉仪的光谱分辨率不再降低, 两球面镜实际上存在一半径为  $\rho_s$  的等效光阑。从图中可以看出, 这一光阑的存在相当于在该成像系统中加入一孔径光阑。这一孔径光阑为系统的出射光瞳, 而入射光瞳是该光阑通过它在它前面的光学系统(透镜)于系统的物空间所成的像(虚像)。

由 (6) 式, 此时物空间的聚光本领为

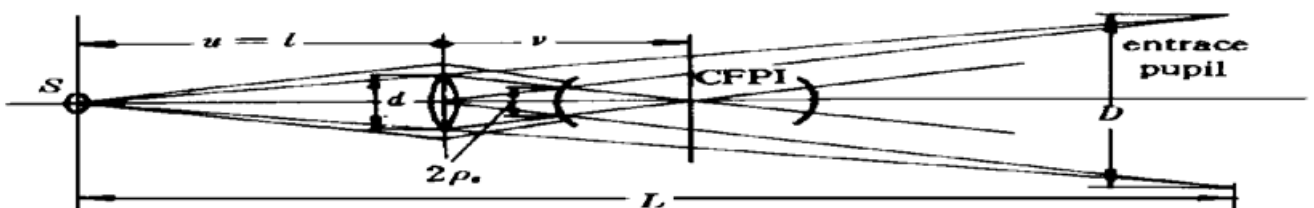


图 4 聚光本领匹配示意图

Fig.4 Schematic of matching the etendue of CFPI to that in the object space

$$E_w = S \cdot \frac{\pi}{4} (d/l)^2 \quad (7)$$

要求 CFPI 与物空间的聚光本领相匹配, 则对光源  $S$  的大小、透镜孔径  $d$  及透镜距  $S$  的距离  $l$  提出了限制条件, 即

$$\frac{\pi}{4} d_1^2 \cdot \frac{\pi}{4} (d/l)^2 \approx \frac{\pi^2 r \lambda}{F} \quad (8)$$

其中,  $d_1$  为被照射点的直径。(8) 式即为两者的匹配条件。

光路设计时, 先根据要求确定  $l$ ; 再选择合适的透镜焦距  $f$  ( $f > r/2$ ), 使其能将  $S$  成像在 CFPI 的中心平面。之后, 调整  $d_1$  与  $d$ , 以满足上式要求。

当  $d_1$  选择过大,  $d$  较小时, 虽然满足上式要求, 但会使系统出现严重的渐晕现象, 导致  $S$  上离光轴较远的光不能被 CFPI 所接收; 当  $d_1$  一定, 选择过小  $d$  时, 干涉仪的聚光本领没有充分利用; 但选择太大的  $d$ , 又增加了成本。因此需合理选择两者使其满足匹配条件。

本文根据现有条件, 选择  $d = 20 \text{ mm}$ ,  $l = 50 \text{ mm}$ ,  $d_1 = 0.6 \text{ mm}$ , 可使两者较好地匹配。

## 4 实验结果

用红宝石脉冲激光器(脉宽为  $30 \pm 10 \text{ ns}$ , 能量为  $350 \text{ mJ}$ ) 照射样品表面, 在微烧蚀效应下激励超声纵波, 该超声波在样品两表面间来回反射, 呈指数衰减。利用本文的接收系统, 经仔细调整光路, 接收到的超声脉冲信号如图 5 (a) 所示。其中样品为  $10 \text{ mm}$  厚的铝板, 表面为机加工表面, 未作任何光学处理。

同样, 在微烧蚀效应下激励的表面波信号如图 5 (b) 所示。图中首先出现的信号是由于脉冲激光器放电时引起的干扰信号。

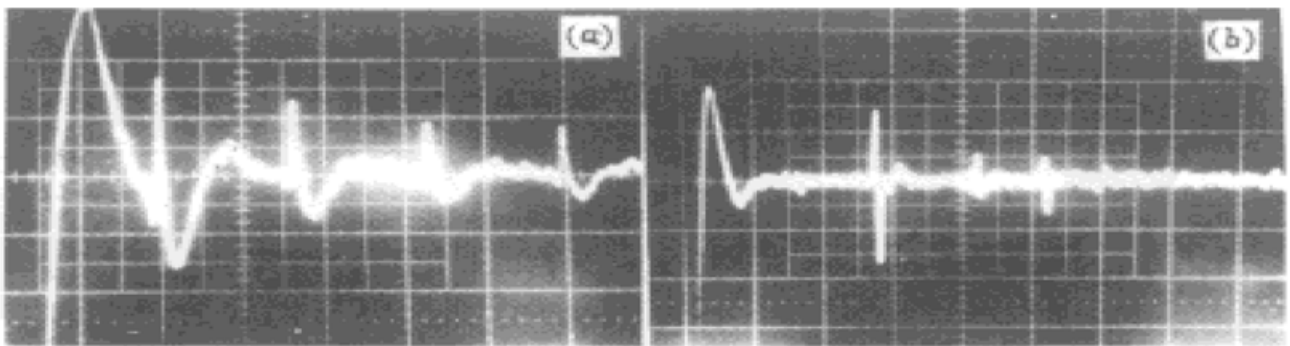


图 5 烧蚀条件下铝板中的激光超声脉冲

(a) 纵波,  $2 \mu\text{s}/\text{div}$ ; (b) 表面波,  $5 \mu\text{s}/\text{div}$

Fig. 5 Laser ultrasonic pulses in ablation conditions for an aluminium plate with a machined-surface

(a) longitudinal wave,  $2 \mu\text{s}/\text{div}$ ; (b) surface wave,  $5 \mu\text{s}/\text{div}$

## 5 结束语

本文的研究工作表明, 将共焦 Fabry-Perot 干涉仪用作超声波接收器时, 必须考虑其聚光本领这一参数。在设计干涉仪时, 就要考虑聚光本领的要求; 同时在使用时还要和物空间的聚光本领相匹配。本文研制的 CFPI 具有较大的聚光本领, 经仔细调整, 使其和物空间的聚光本领相匹配, 可较好地接收到微幅窄超声脉冲信号, 其信号的信噪比很大, 足以满足进一步的信

号处理要求。

### 参 考 文 献

- 1 Hercher M. . The spherical mirror Fabry-Perot interferometer. *Appl. Opt.*, 1968, 7(5) : 951~ 966
- 2 Monchalin J. P., Heon R. . Laser ultrasonic generation and optical detection with a confocal Fabry-Perot interferometer. *Materials Evaluation*, 1986, 44(9) : 1231~ 1237
- 3 Scruby C. B., Drain L. E. . *Laser Ultrasonics: Techniques and Applications*. Adam: Hilger, 1990

## Analyses of Light Gathering Power for an Ultrasound Receiver with a Confocal Fabry-Perot Interferometer

He Cunfu

(*Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016*)

Zhou Xingeng

(*Tsinghua University, Beijing 100084*)

**Abstract** The light gathering power for an ultrasound receiver with a confocal Fabry-Perot interferometer is analyzed in detail. The light gathering power of the interferometer, the etendue in the object space and the conditions of matching one to the another are given. Parts of experimental results obtained in the matching conditions are presented.

**Key words** Fabry-Perot interferometer, ultrasonic receiver, light gathering power