

实验 9.8 用双光栅测量微弱振动

1842 年多普勒 (Doppler) 提出, 当波源和观察者彼此接近时, 接收到的频率变高; 而当波源和观察者彼此相离开时, 接收到的频率变低。这种现象在电磁波和机械播种都存在。即当波源和观察者之间存在相对运动时, 观察者所接收到的频率不等于波源振动频率, 这种现象称为多普勒效应。而当光源与接收器之间有相对运动时, 接收器感受到的光波频率不等于光源频率, 这就是光学的多普勒效应或电磁波的多普勒效应。该效应已经在科学技术以及医学的许多领域得到应用。

本实验用激光多普勒效应测量微弱振动, 是一种精密的光电系统, 它使用了多种光电转换和处理技术, 是以一个综合性很强的实验。

一、实验目的

1. 熟悉一种利用光的多普勒频移形成光拍的原理, 精确测量微弱振动位移的方法;
2. 作出外力驱动音叉时的谐振曲线。

二、实验仪器

双光栅微弱振动测量仪, 双踪示波器

三、实验原理

1. 位相光栅的多普勒频移

所谓的位相材料是指那些只有空间位相结构, 而透明度一样的透明材料, 如生物切片、油膜、热塑以及声光偏转池等, 他们只改变入射光的相位, 而不影响其振幅。位相光栅就是用这样的材料制作的光栅。

当激光平面波垂直入射到相位光栅时, 由于位相光栅上不同的光密和光疏媒质部分对光波的位相延迟作用, 使入射的平面波在出射时变成折曲波阵面, 如图 1 所示, 由于衍射干涉作用, 在远场我们可以用大家熟知的光栅方程来表示:

$$d \sin \theta = n \lambda \quad (1)$$

式中 d 为光栅常数, θ 为衍射角, λ 为光波波长。

然而, 如果由于光栅在 y 方向以速度 v 移动, 则出射波阵面也以速度 v 在 y 方向移动。从而在不同时刻, 对应于同一级的衍射光线, 它的波阵面上的点, 在 y 方向上也有一个 vt 的位移量, 如图 2 所示。

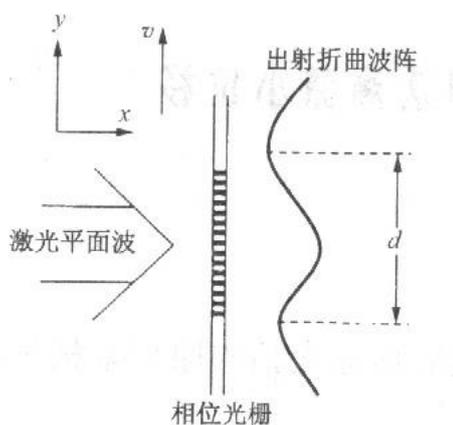


图 1

这个位移量对应于光波位相的变化量为 $\Delta\Phi(t)$

$$\Delta\Phi(t) = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \Delta s = \frac{2\pi}{\lambda} vt \sin \theta \quad (2)$$

(1) 带入 (2)

$$\begin{aligned}\Delta\Phi(t) &= \frac{2\pi}{\lambda} vt \frac{n\lambda}{d} \\ &= n2\pi \frac{v}{d} t = n\omega_d t\end{aligned}\quad (3)$$

式中 $\omega_d = 2\pi \frac{v}{d}$

把光波写成如下形式:

$$\begin{aligned}E &= E_0 \exp[i(\omega_0 t + \Delta\Phi(t))] \\ &= \exp[i(\omega_0 + n\omega_d)t]\end{aligned}\quad (4)$$

显然可见, 移动的位相光栅的 n 级衍射光波, 相对于静止的位相光栅有一个大小:

$$\omega_a = \omega_0 + n\omega_d \quad (5)$$

的多普勒频率, 如图 3 所示。

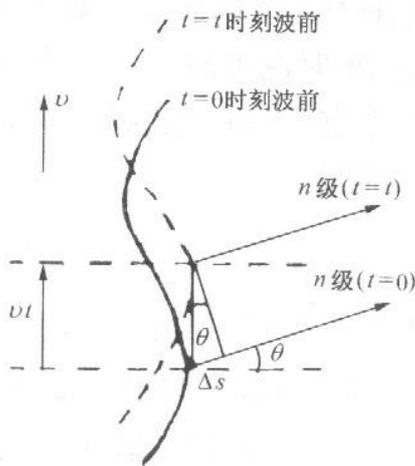


图 2

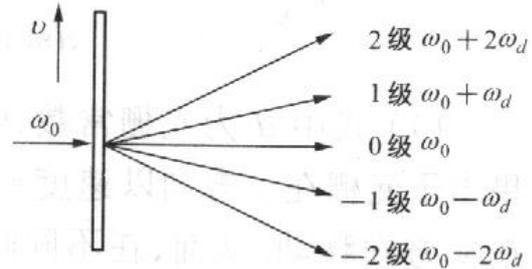
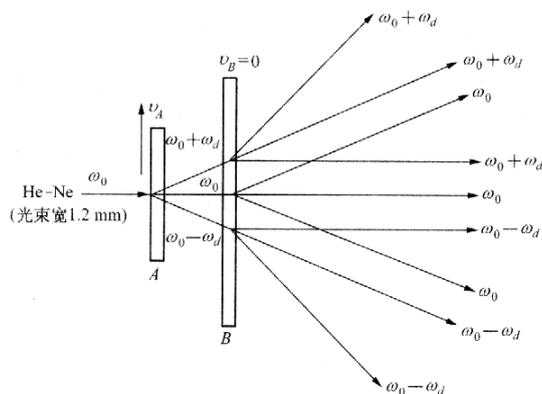


图 3

2. 光拍的获得与检测

光波的频率甚高, 为了要从光频 ω_0 中检测出多普勒频移, 必须采用“拍”的方法。也就是要把已频移的和未频移的光束相互平行叠加, 以形成光拍。本实验形成光拍的方法是采用两片完全相同的光栅平行紧贴, 一片(B)静止, 另一片(A)相对移动。激光通过双光栅后形成的衍射光, 即为两个光束的平行叠加。如图 4 所示, 光栅 A 以速度 v_a 移动起频移作用, 而光栅 B 静



止不动，只起衍射作用，所以通过

图 4

双光栅后出射的衍射光包含了两种以上不同频率而又相互平行的光，由于双光栅紧贴，激光束具有一定的宽度，故该光束能平行叠加，这样直接而又简单地形成了光拍。当此光拍信号进入光电检测器，由于检测器的平方律检波性质，其输出光电流可由如下所述关系求得：

$$\text{光束 1: } E_1 = E_{10} \cos(\omega_0 t + \varphi_1)$$

$$\text{光束 2: } E_2 = E_{20} \cos[(\omega_0 + \omega_d)t + \varphi_2] \quad (\text{取 } n=1)$$

$$\text{光电流: } I = \xi(E_1 + E_2)^2 \quad (\xi \text{ 为光电转换常数})$$

$$= \xi \left\{ \begin{array}{l} E_{10}^2 \cos^2(\omega_0 t + \varphi_1) \\ E_{20}^2 \cos^2[(\omega_0 + \omega_d)t + \varphi_2] \\ E_{10}E_{20} \cos^2[(\omega_0 + \omega_d - \omega_0)t + (\varphi_2 - \varphi_1)] \\ E_{10}E_{20} \cos^2[(\omega_0 + \omega_0 - \omega_d)t + (\varphi_2 + \varphi_1)] \end{array} \right\} \quad (6)$$

因为光波 ω_0 甚高，光电检测器不能检测出来，所以在 (6) 式中只有第三项拍频信号：

$$i_s = \xi \{ E_{10}E_{20} \cos^2[\omega_d t + (\varphi_2 - \varphi_1)] \}$$

能被光电检测器所检测出来。

光电检测器所能测到的光拍信号的频率为

$$F_{\text{拍}} = \frac{\omega_d}{2\pi} = \frac{v_A}{d} = v_A n_\theta \quad (7)$$

其中 $n_\theta = \frac{1}{d}$ 为光栅常数，本实验中 $n_\theta = 100$ 条/mm

3. 微弱振动位移量的测量

从 (7) 式可知， $F_{\text{拍}}$ 与光频率 ω_0 无关，且当光栅常数 n_θ 确定时，与光栅移动速度 v_A 成正比。如果把光栅粘到音叉上，则 v_A 是周期性变化的，所以光拍信号的频率 $F_{\text{拍}}$ 也是随时间变化的，微弱振动的位移振幅为：

$$A = \int_0^{T/2} v(t) dt = \frac{1}{2} \int_0^{T/2} \frac{F_{\text{拍}}(t)}{n_\theta} dt = \frac{1}{2n_\theta} \int_0^{T/2} F_{\text{拍}}(t) dt$$

式中 T 为音叉振动周期， $\int_0^{T/2} F_{\text{拍}}(t) dt$ 可以直接在示波器的荧光屏上计算光拍波形数而得到，因为 $\int_0^{T/2} F_{\text{拍}}(t) dt$ 表示 $T/2$ 内的波的个数，不足一个完整波形的首数及尾数，需要在波群的两端，按反正弦函数折算为波形的分数部分，即

$$\text{波形数} = \text{整数波形数} + \frac{\arcsin a}{360^\circ} + \frac{\arcsin b}{360^\circ}$$

式中 a, b 为波群的首尾幅度和该处完整波形的振幅之比。(波群指 $T/2$ 内的波形, 分数波形数包括满 $1/2$ 个波形为 0.5, 满 $1/4$ 个波形为 0.25)

四、实验仪器介绍

双光栅微弱振动测量仪面板结构如图 5 所示。

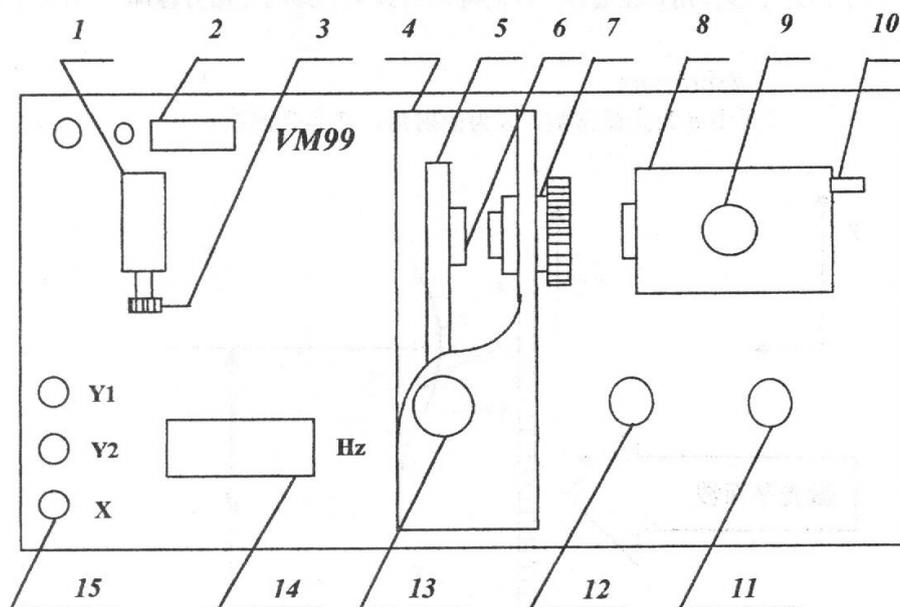


图 5

1-光电池座, 顶部有光电池盒, 盒前方一小孔光阑; 2-电源开关; 3-光电池升降手轮; 4-音叉座; 5-音叉; 6-粘于音叉上的光栅 (动光栅); 7-静光栅架; 8-半导体激光器; 9-锁紧手轮; 10-激光器输出功率调节; 11-信号发生器输出功率调节; 12-信号发生器频率调节; 13-驱动音叉用耳机; 14-频率显示; 15-信号输出, Y1: 拍频信号, Y2: 音叉驱动信号, X: 为示波器提供“外触发”扫描信号, 使得示波器显示的波形稳定。

其实验装置原理图如图 6 所示。

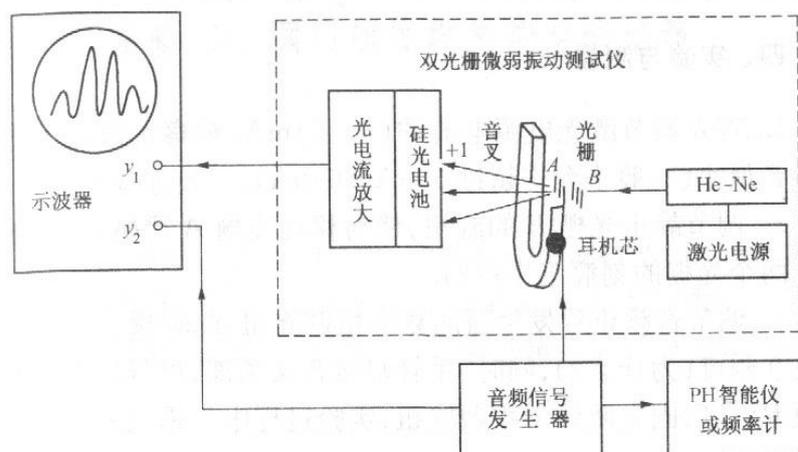


图 6

本仪器技术指标: 测量精度: $5\mu\text{m}$; 分辨率: $1\mu\text{m}$; 激光器: $\lambda = 635\text{nm}, 0 \sim 3\text{mw}$;

音叉：谐振频率 500Hz 左右。

五、实验内容及步骤

1. 将双踪示波器的 CH1、CH2、“外触发”分别接到双光栅微弱振动测量仪的 Y1、Y2 和 X 输出上；
2. 小心取下“静光栅架”（注意保护光栅），稍稍松开激光器顶部的紧锁手轮，小心地上下左右调节激光器，让激光光束通过静止光栅的中心孔；调节光电池架手轮，让某一级衍射光正好落入光电池的小孔内。
3. 小心装上“静光栅架”，并使其尽可能与动光栅接近，但不可相碰；用一屏放于光电池架处，慢慢转动光栅架，仔细观察、调节，使得两个光束尽可能重合。去掉观察屏，轻轻敲击音叉，调节示波器，配合调节激光器输出功率，这时应该能看到拍频波，如图 7 所示。
4. 将“功率”旋钮调至 6—7 附近，再调节“频率”旋钮（500Hz 附近），使音叉谐振。调节时用手轻轻地按音叉顶部，找出音叉的固有频率。如果音叉谐振太强烈，将“功率”旋钮调小，使示波器上看到的 T/2 内光拍的波数为 10~20 个左右为宜。
5. 固定“功率”旋钮位置，调节“频率”旋钮，作出音叉的频率——振幅曲线（即外力驱动音叉时的谐振曲线）。
6. 保持“功率”不变，改变音叉的有效质量，研究谐振曲线的变化趋势，并说明原因。

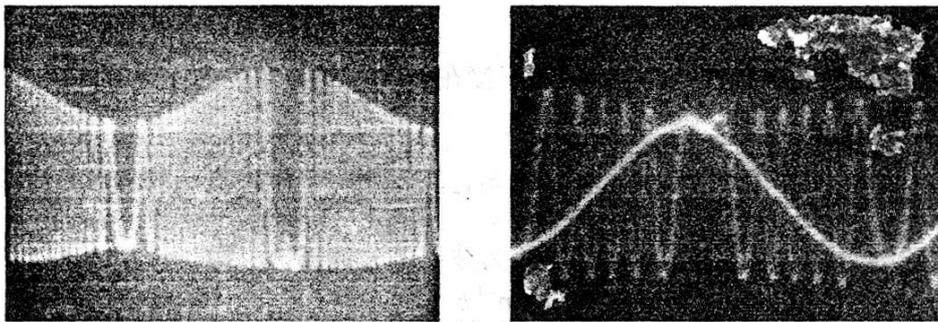


图 7 实验现象参考图

六、思考题

1. 如何判断动光栅与静光栅的刻痕已经平行？
2. 作外力驱动音叉谐振曲线时，为什么要固定信号的功率？
3. 本实验测量方法有何优点？测量微振动位移的灵敏度是多少？