

一种回波重合法装置

王积方 袁茂森 李华丽 唐汝明

(中国科学院物理研究所)

超声脉冲“回波重合法”是目前广泛采用的声速测量方法。其原理是：通过对造成任一 rf 脉冲中两回波重合的扫描频率测量，以确定超声波在样品中往返传播所经历的时间。用这种方法测量超声波传播时间，精度比较高。为了保证和提高这种精度，我们对装置的稳定性、同步、回波重合的分辨本领都作了改进。

在一般的“回波重合法”装置中^[1]，rf 脉冲和驱动回波重合的信号源，稳定性不太高。当载波频率作较大变动时，载波波形易畸变，载波频率也不能直接测量。这些缺点都会影响声速测量精度。对于需作长时间观测的实验，由于载波频率和扫描频率稳定度不够高，还会引起新的测量误差，为此我们作如下改进。

我们的装置见图 1。其中，总信号源是频率稳定度极高的频率综合器，其输出信号的作用为：(1) 作 rf 脉冲的载波；(2) 经过分频、驱动示波器扫描，使回波重合；(3) 同步其它部件。我们采用“平衡调制”产生 rf 脉冲，这样可使载波频率在较宽范围内变动时，波形不畸变。同时，由于载波来自频率综合器，rf 脉冲频率稳定度大为提高，频率值还可准确知道。由于采用经过分频的频率综合器信号控制示波器扫描，所以扫描频率也很稳定，两个回波一经重合，即可长时间保持不变，这对周期很长的实验很有利。同时，这种用外触发控制示波器扫描，可充分发挥示波器本身的扫描功能，

使重合波形好，扩展得开，能提高辨别回波重合的分辨本领。所有这些，都有利于测量精度的提高。图 1 中的部件 4 和 7，分别提供调制和加亮脉冲。本装置整个系统都由频率综合器信号控制，所以同步性也很好。

回波的重合，主要靠分频器的分频，以使触发信号频率的倒数等于或近似等于拟重合的两回波之间时间间隔。必要时再少量改变频率综合器频率，即可使回波中的载波达到完全周-周对应重合。本装置频率范围为 1—10 MHz，时间测量精度优于 10^{-4} ，灵敏度为 0.5 ns。

新的确定 n 的方法

任意两回波之间的时间间隔一般表示为^[1,2]

$$T = P\delta - \frac{Pr}{360f} + \frac{n}{f}, \quad (1)$$

式中 P 为拟重合的两回波相隔回波个数， δ 为超声波在样品中往返一次所需的真正传播时间， r 为超声波经过换能器和样品交界面时的反射角， f 为载波频率， n 表示两回波中载波误差重合的周数， n 值可以是 0、 ± 1 、 ± 2 、... 中任一整数。为了找出 $n=0$ 的重合条件，以及进行反射角 r 的修正，一般使用 McSkimin 方法^[1,2]，其过程相当繁杂。

现结合本装置的特点，采用以下新方法：根据文献 [3]，当 rf 脉冲载波频率接近于换能器谐振频率 f_c ，而且当耦合层很薄时（这在实际上是可以做到的），对应的反射角 $r_c \rightarrow 0$ ，并表示为

$$\partial r_c / \partial f = -2\pi K / f_c, \quad (2)$$

其中 $K = \rho_c v_{t1} / \rho_s v_s$ ， $\rho_c v_{t1}$ 和 $\rho_s v_s$ 分别为换能器和样品的特性声阻抗。所以当载波频率 $f \rightarrow f_c$ 时，反射角 r 可表示为

$$r = -\frac{2\pi K(f - f_c)}{f_c}. \quad (3)$$

把 (3) 式代入 (1) 式后，可得 T 的新表示式为

$$T = P\delta - PK\left(\frac{1}{f} - \frac{1}{f_c}\right) + \frac{n}{f}. \quad (4)$$

利用 (4) 式确定 n 是很方便的。我们总可以在 f_c 附近，在不同分频条件下，各测量几组重合数据。在这些重合数据中，对应于同一 n 值的 T 可表示为

$$T_i = P\delta - PK\left(\frac{1}{f_i} - \frac{1}{f_c}\right) + \frac{n}{f_i},$$

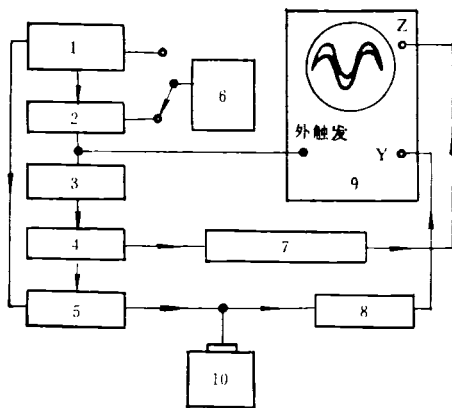


图 1 新“回波重合法”装置测量框图

1. 频率综合器 (PZ13); 2. 可变分频; 3. 固定分频;
4. 脉冲; 5. 平衡调制; 6. 频率计; 7. 双通道延迟宽度; 8. 放大器; 9. 示波器; 10. 样品

$$T_2 = P\delta - PK \left(\frac{1}{f_2} - \frac{1}{f_1} \right) + \frac{n}{f_2}$$

令 $\Delta\tau = \tau_2 - \tau_1 = \frac{1}{f_2} - \frac{1}{f_1}$, 从而可以得到

$$\Delta T / \Delta\tau = -PK + n \quad (5)$$

从(5)式出发, 根据在不同分频条件下测定的一些重合数据, 作 $T-\tau$ 图, 由 $T-\tau$ 关系的斜率 ($= -PK + n$) 和已知的 P, K 值, 即可判断 n .

熔石英的实验结果

我们测量了熔石英的纵、横波声速, 并与已有结果作比较. 表 1, 2 分别为其判断 n 的纵波和横波实验

表 1 熔石英纵波判断 n 的数据

20 分频		21 分频		22 分频	
$T(\mu s)$	$\tau(\mu s)$	$T(\mu s)$	$\tau(\mu s)$	$T(\mu s)$	$\tau(\mu s)$
10.3944	0.1019	10.3906	0.0962	10.3873	0.0911
10.2960	0.1009	10.2955	0.0953	10.2954	0.0903
10.1997	0.1000	10.2003	0.0945	10.2023	0.0895

表 2 熔石英横波判断 n 的数据

31 分频		32 分频		33 分频	
$T(\mu s)$	$\tau(\mu s)$	$T(\mu s)$	$\tau(\mu s)$	$T(\mu s)$	$\tau(\mu s)$
16.272	0.1043	16.266	0.1004	16.362	0.0974
16.166	0.1036	16.165	0.0998	16.262	0.0968
16.064	0.1030	16.067	0.0992	16.165	0.0962

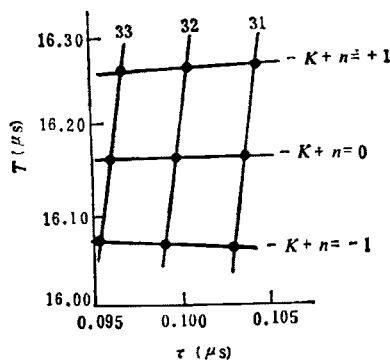


图 2 熔石英纵波的 $T-\tau$ 图

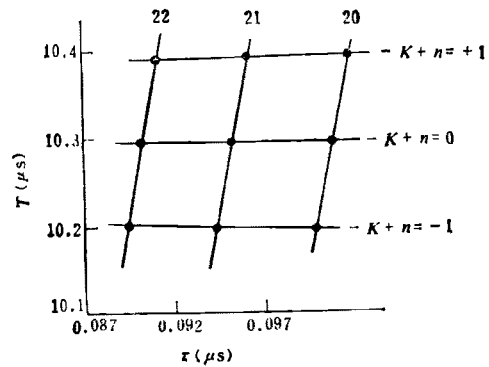


图 3 熔石英横波的 $T-\tau$ 图

表 3 熔石英声速值 (m/s)

	本工作	文献值
纵波	5954.53	5967.17 ^[1] , 5954 ^[2] 5948.5978 ^[3] , 5965.34 ^[4]
横波	3767.28	3767.84 ^[4]

数据. 图 2, 3 则为对应的 $T-\tau$ 图.

$n = 0$ 的重合条件一经判断, 即可在接近于换能器谐振频率的载波条件下, 确定对应于完全重合的 T , 从而可由(4)式算出 δ , 并进而得到声速 $v = 2l/\delta$, l 为样品长度. 表 3 是本装置测定的熔石英纵、横波声速值和文献值. 我们得到的熔石英 2.3 阶弹性模量结果见文献 [4].

本工作曾得到何寿安先生大力支持和查济璇同志许多帮助, 谨此表示谢意.

参 考 文 献

- [1] E. P. Papadakis, *J. Acoust. Soc. Am.*, 42(1967), 1045.
- [2] H. J. McSkimin, *J. Acoust. Soc. Am.*, 33 (1961), 12.
- [3] J. Williams, J Lamb, *J. Acoust. Soc. Am.*, 30 (1958), 308.
- [4] 王积方等, 物理学报, 31(1982), 1424.
- [5] E. H. Bogardus, *J. Appl. Phys.*, 36(1965), 2504.