

5—250MHz 超声衰减、声速测试仪

吴贵玉 孔祥致 吴昆裕 周康源 张谦琳 陆玲珍

(中国科学技术大学声学教研室)

1983年5月5日收到

研制了可工作于 2—250MHz 的超声衰减、声速测试仪,它利用反射脉冲回波列与指数衰减波形相比较的方法测量表达为 $\text{dB}/\mu\text{s}$ 或 dB/cm 的衰减系数值。可以由电位器刻度盘读数,查衰减系数定标曲线,求出衰减系数值;也可以由选通门电路任意选出反射脉冲回波列中的两个脉冲,送入与本机配合使用的视频脉冲对数差分放大器放大后,由电表指示或在 $X-Y$ 函数记录仪上自动记录。

物理动态过程中(温度、压力、电磁场、辐照)材料超声衰减的变化过程。

一、引言

超声衰减系数和声速是表征材料声学性能的两个重要参数,而且超声波在介质中的衰减和声速,与该介质的微观结构及许多重要的物理、化学性质紧密相关,故无论在材料的声学性能检验或在固体物理、分子声学、物理声学等基础理论研究方面,超声衰减和声速测量设备均有广泛的应用。

1960年 B. Chick 等^[1]报道了 5—200MHz 的超声衰减测量装置,后来 A. Г. Шепелев^[2]为开展低温物理研究建立了类似的设备,研制这种测量手段在国内也较早地受到重视^[3]。但上述超声衰减测量设备的共同特点是全部使用电子管电路,因而较笨重,且国内测量装置的工作频率还较低。本仪器是参照 B. Chick 等提出的原理,使用国产元器件研制的,采用电子管和半导体器件混合结构,既保证了发射、混频等电路承受较高电压的要求,又使仪器较紧凑、轻便。它具有工作频率较高,测试功能较完善的特点。有精密延迟电路,故能精确地测量声速;有指数波形和选通门电路,能方便地测量衰减系数。此外还研制了与本仪器配合使用的视频脉冲对数差分放大器^[4]和射频脉冲比较器,构成一套较为完整的超声衰减、声速测量仪器,可以组成超声衰减自动测量系统,以便跟踪各种

二、技术性能

1. 同步脉冲重复频率 300Hz;

2. 调制脉冲宽度 $1\mu\text{s}$,

调制脉冲幅度 50—1000 v, 分 10 档可调,发射脉冲频率范围 5—250MHz, 分 12 个波段连续可调,发射脉冲延时范围 0—40 μs ;

3. 本振频率范围 40—300MHz, 分 6 个波段连续可调;

4. 中频放大器中心频率 40 MHz, 增益 > 85dB, 带宽 3MHz, 线性范围 > 25dB, 可调范围为 30dB, 视频放大器增益 > 20dB;

5. 指数衰减曲线变化范围 0.01—4dB/ μs , 分五档连续可调, 读数精度 $\pm 1 \times 10^{-2}$;

6. 选通门宽度 2—10 μs 连续可调; 选通门移动范围 40—140 μs 连续可调;

7. 延时脉冲延迟范围 40—140 μs 、延时时间精度 $\pm 0.1\mu\text{s}$, 声速测量精度 $(1-5) \times 10^{-3}$, 标 10 μs 。

三、工作原理

1. 方框图及原理概述

本仪器由同步、发射、接收、扫描与增辉、指

数波形与时标、选通门、显示、电源等电路组成。图1是它的方框图。主控振荡器产生300Hz的同步方波,经延迟和分频后分别触发扫描发生器和调制脉冲形成器、指数波形发生器、时标发生器。触发调制脉冲形成器和指数波形发生器的信号取自分频后方波的前后沿,以实现交替触发,使在同一时基上稳定地显示反射脉冲回波列和指数波形。由于分别具有延迟电路,故相对位置能在一定范围内移动。

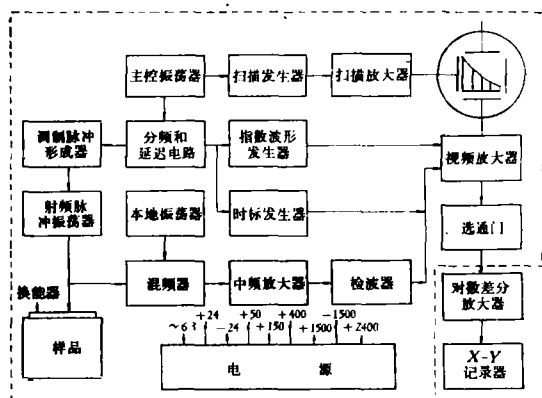


图1 仪器方框图

调制脉冲形成器输出的负向脉冲(见图2),作为射频脉冲发生器的驱动脉冲。射频脉冲发生器输出的射频脉冲(见图3)馈给换能器,转换成超声脉冲耦合到测试样品中,超声脉冲在样品两平行端面间来回反射,逐渐衰减并由同一换能器接收,经外差式混频器、中频放大器放大检波后,再由视频放大器放大与指数波形一起加到示波管上显示。调整指数波形与反射脉冲回波列,使指数波形与反射回波脉冲顶部对齐,可测得超声衰减系数值。改变发射脉冲频率和本振接收频率即可得到不同频率下的超声衰减系数。将样品和换能器置于温度变化等环境中,即可测量超声衰减与外加物理条件的关

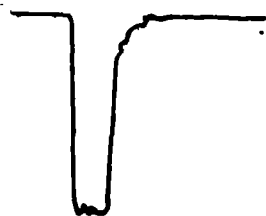


图2 调制脉冲波形脉宽: $1\mu\text{s}$, 幅度: 1000V

系。测量两个回波脉冲前沿之间的时间,由样品厚度即可算出声速,图4和图5是在熔石英、铌酸锂样品上得到的反射回波列照片。

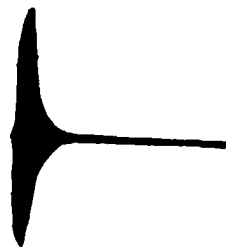


图3 射频发射脉冲波形,脉宽: $1\mu\text{s}$, 频率: 130MHz

2. 主要电路原理

(1) 同步电路: 由多谐振荡器和分频器组成,给出 300Hz 和 150Hz 同步方波。

(2) 扫描和增辉电路: 300Hz 同步方波微分后触发时基延时单稳,此电路起延迟扫描作用,其延迟时间为 40—140 μs ,延迟单稳输出的方波用来触发扫描电路。扫描电路由斯密特电路、恒流源和锯齿波发生器组成,具有良好的线性。

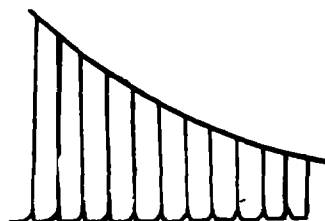


图4 熔石英中的反射回波列,纵波,
 $\alpha = 0.17\text{dB/cm}$, $f = 50\text{MHz}$, 声程 $l = 3.064\text{cm}$.

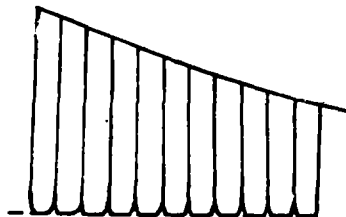


图5 LiNbO_3 中的反射回波列,纵波, $\alpha = 0.06\text{dB/cm}$,
 $f = 250\text{MHz}$ [001] 方向,声程 $l = 4.2187\text{cm}$

由斯密特电路输出的方波经放大,由跟随器输出幅度为 50V 的方波加到示波管栅极起增辉作用。

(3) 指数波形发生器: 用 150Hz 方波来触

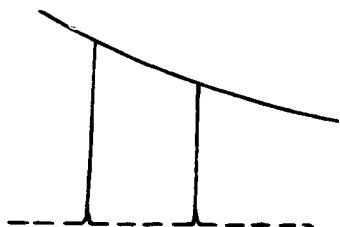


图6 送至对数差分放大器的两个选通回波脉冲

发指数波形延时单稳态,其作用是使指数波形的位罝能在40—140 μ s范围内调节。延时电路使用了十进多圈电位器,因而提高了延时时间的测量精度。指数波形发生器由开关电路和RC电路组成,指数波形由电容放电过程得到。指数波形衰减率开关接有5档数值不同的电容(即 α 粗调),每档电容与电位器(即 α 细调)一起决定指数波形的衰减率。电位器带有50分度刻度盘,根据刻度盘位罝和电容所处挡级便决定了指数波形的衰减率,指数波形的幅度也是可调的。

(4)选通门电路:选通门电路由两支完全相同的电路组成,它的作用是从一系列反射脉冲回波列中任意选出两个回波脉冲。每路选通门主要由两级单稳延时电路和选通电路组成,第一级延时电路的作用是调节选通脉冲的位置,第二级延时电路的作用是选通脉冲的宽度。选通信号的宽度和位置在示波管上以加亮的形式示出,调节选通门到所需的反射回波脉冲,该回波脉冲即可由仪器面板上的插座口输出。两路选通信号可送至对数差分放大器,由电表指示两脉冲幅度相差的分贝数或用X-Y记录仪自动记录。也可由任一路选通门取出一个回波脉冲送至Boxcar积分器观测超声衰减随温度等条件的相对变化。对于图5所示的LiNbO₃中反射脉冲回波列,启动选通门,可以得到图6的两个选通加亮脉冲。

(5)调制脉冲形成器及射频脉冲发生器:采用仿真线形成调制脉冲,仿真线由10节L、C网络组成,其特性阻抗为100 Ω 。150Hz的同步方波经整形、放大、微分后,由阴极输出器输出约300V的正脉冲打开氢脉冲闸流管(ZQM-

35/3),这时充电至2000V的仿真线通过闸流管放电,在100 Ω 负载电阻上得到宽度为1 μ s的负极性脉冲,其前沿时间小于50ns,幅度约为1000V。此负极性脉冲即作为射频脉冲发生器的驱动脉冲。仿真线负载电阻由10个无感线绕电阻组成分压器,以改变调制脉冲输出幅度。

5-250MHz射频脉冲发生器采用双三极管(6N15)推挽振荡电路,用12组振荡器覆盖5—250MHz的工作频率,波段及相应的频率范围下表

波段	1	2	3	4	5	6
频率范围(MHz)	4—6	6—9	9—13.5	13—20	20—30	30—45
	7	8	9	10	11	12
	40—60	50—75	70—105	100—150	130—200	190—250

(6)外差接收电路:超外差变频器采用三极管(6N11)单栅变频电路,回波信号和本振信号都加至混频管栅极上,这样可以获得较大的变频增益和较低的噪声。本地振荡用双三极管(6N15)推挽振荡电路,用6组本振覆盖所接收的频段如下表

波段	1	2	3	4	5	6
本振频率(MHz)	40—65	50—75	63—100	80—125	120—200	180—300

中频放大器由6级调谐放大器组成,中心频率为40MHz,带宽为3MHz,增益大于85dB,为适应接收信号的强弱变化,中放前三级加有增益控制电路,其可调范围大于30dB。

四、校准方法

1. 频率校准

(1)本振频率校准:对6组本地振荡器用RFT400MHz数字频率计来测定其振荡频率并用SS-6300DC-300MHz示波器观测振荡频率和波形,得到本振各波段的振荡频率和调谐可变电容器转角的关系。

(2) 射频脉冲载频校准: 有三种方法

a 用 SS-6300 DC-300 MHz 示波器观察射频脉冲波形, 用适当的扫描速度将射频脉冲拉开, 使载频振荡波形清楚可见, 便可计算射频频率, 得到射频脉冲振荡频率与可变电容器转角的关系。

b 以负的直流电源替代负极性调制脉冲, 使射频脉冲振荡器做连续振荡, 用 RFT-400 MHz 数字频率计测定其频率。

c 在前述两种方法校准的基础上, 由已知的中频放大器中心频率和已校准的本地振荡频率, 用标准基频石英晶片和变频关系来校准射频发射脉冲的频率。

2. 指数波形衰减率的定标

研制了射频脉冲比较器来校准指数衰减波形^[4]。射频脉冲比较器产生一个频率为 10MHz, 宽度为 $2\mu\text{s}$, 幅度为 500mv 的射频脉冲。这射频脉冲的产生受本机同步信号控制, 且能在扫描周期内沿时间轴移动位置。将这射频脉冲送入 0.01dB 步进的 60dB 精密衰减器适当衰减后, 再送入本机接收系统, 示波管上得到一个幅度可调、水平位置可移动的视频脉冲。对某一指数衰减波形, 在不同水平位置处(相应一定的时间间隔), 调节精密衰减器, 使视频脉冲顶部与指数波形对齐, 便可算出这一指数波形的衰减率(以 $\text{dB}/\mu\text{s}$ 表示), 用这种方法可以得到指数衰减波形定标曲线

3. 时标校准

调节时标校准电位器, 用数字频率计校准 $10\mu\text{s}$ 时标脉冲的重复频率, 使时标准确等于 $10\mu\text{s}$, 其误差 $<0.25\%$ 。

五、测量方法

1. 衰减系数 α 的测量

(1) 指数衰减曲线比较法: 收到反射回波列并调谐好之后, 调节 α 粗调开关与 α 细调电位器及指数波形幅度电位器, 使指数波形与反射回波列严格重合。由 α 粗调档级和 α 细调读数查定标曲线, 得出衰减系数 α 值。

应用声学

(2) 射频脉冲比较器法: 射频脉冲比较器向接收系统送入一个幅度可调水平位置可移动的射频脉冲, 经接收系统检波后可称为比较脉冲。调节比较脉冲幅度并沿时间轴移动位置, 使它分别与任意两个按指数规律衰减的回波脉冲在幅度上齐平, 便可测得这两个回波脉冲衰减的分贝数。由这两个回波脉冲的时间间隔测量, 即可求出以 $\text{dB}/\mu\text{s}$ 表示的衰减系数值。

(3) 差分对数放大器法: 对于某一反射回波列, 调两路选通信号到任意两个反射脉冲上, 并送入视频脉冲对数差分放大器, 即可由对数放大器上电表指示两个脉冲相差的分贝数, 也可由 X-Y 记录仪自动记录。

用上述方法测得的以 $\text{dB}/\mu\text{s}$ 为单位的衰减系数值除以声速即转换为以 dB/cm 为单位的衰减系数值, 声速的单位要用 $\text{cm}/\mu\text{s}$ 。

2. 声速 c 的测量

测量声速之前应先校准时标。使用精密延迟电路测量声速。指数波形的延迟是由一个带十进刻度盘的多圈电位器控制的, 延迟时间与多圈电位器的转角成线性关系。做适当调节可使多圈电位器刻度盘于“0”位置时, 指数波形起始部分与第一个时标重合, 使多圈电位器刻度盘处于“10”位置时, 指数波形起始部分与第十一个时标重合。测定对应于任意两个回波脉冲的刻度盘读数之差, 可精确的测定时间间隔, 其读数误差小于 $0.1\mu\text{s}$, 由样品厚度便可得到声速之值。

限于篇幅, 应用本仪器所做的超声衰减和声速测量的实验工作, 将另文发表。

在仪器方案调研中, 南京大学声学研究所林清波同志曾向我们介绍了他们的宝贵经验, 在此特致谢意。

参 考 文 献

- [1] B. Chick, G. Anderson and R. Truell, *J. Acoust. Soc. Amer.* 32 (1960), 186—196.
- [2] A. Г. Шепелев, Г. Д. Филимонов, *ПТЭ*. 1(1965), 194—198.
- [3] 潘正良、苏会和, *声学学报* 4(1979) 188—198.
- [4] 周康源第二届无损检测学术会议论文摘要, 北戴河, 1981, 59