

测定介质中的声速

一、数据及处理

1、共振频率

$$f_0 = 40.126\text{kHz}$$

$$\sigma_{f_0} = 0.001\text{kHz}$$

2、极值法

(1) 数据记录

极值点 <i>i</i>	x_i/mm	V_{pp}/V	极值点 <i>i</i>	x_i/mm	V_{pp}/V
1	14.023	3.62	11	53.610	1.04
2	18.515	3.09	12	49.511	1.19
3	22.954	2.61	13	44.997	1.30
4	27.063	2.20	14	40.609	1.42
5	31.192	1.74	15	36.281	1.61
6	36.327	1.61	16	31.837	1.87
7	40.782	1.45	17	27.378	2.18
8	45.061	1.31	18	22.863	2.58
9	49.720	1.18	19	18.371	3.01
10	53.569	1.03	20	14.700	3.57

(2) 数据处理

平均位置 <i>i</i>	\bar{x}_i/mm	\bar{V}_{pp}/V
1	14.362	3.60
2	18.443	3.05
3	22.908	2.50
4	27.220	2.19
5	31.514	1.80
6	36.304	1.61
7	40.700	1.44
8	45.029	1.30
9	49.616	1.18
10	53.590	1.04

<i>i</i>	1	2	3	4	5
$\Delta x_i = \frac{1}{5}(x_{i+5} - x_i)/\text{mm}$	4.388	4.451	4.424	4.479	4.415

利用逐差法处理数据：

$$\bar{\Delta x} = \frac{\sum_{i=1}^5 \Delta x_i}{5} = 4.4317\text{mm}$$

计算不确定度：

$$\sigma_A = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^5 (\Delta x_i - \bar{\Delta x})^2}{5(5-1)}} = 0.0139\text{mm}$$

$$\sigma_B = e/\sqrt{3} = 0.00577\text{mm}$$

$$\sigma_{\Delta x} = \sqrt{(\sigma_A)^2 + (\sigma_A)^2} = 0.015\text{mm}$$

故

$$\overline{\Delta x} \pm \sigma_{\Delta x} = (4.432 \pm 0.015)\text{mm}$$

因此得到声波波长为

$$\lambda = 2\overline{\Delta x} = 8.864\text{mm}$$

$$\lambda \pm \sigma_\lambda = (8.86 \pm 0.03)\text{mm}$$

因此得到声速为

$$v = \lambda f_0 = 355.516\text{m/s}$$

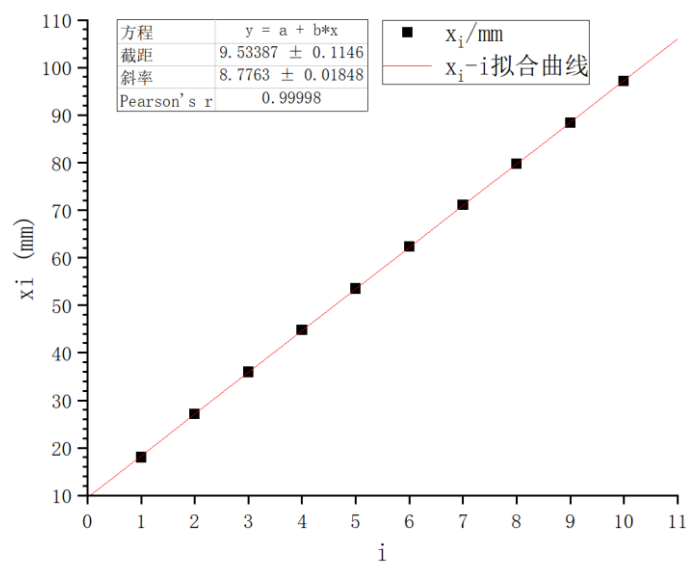
$$\sigma_v = v \sqrt{\left(\frac{\sigma_{f_0}}{f_0}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_\lambda}{\lambda}\right)^2} = 1.2\text{m/s}$$

因此

$$v \pm \sigma_v = (355.5 \pm 1.2)\text{m/s}$$

3、相位法

同相点 <i>i</i>	x_i/mm	x'_i/mm	\bar{x}_i/mm
1	18.082	17.922	18.002
2	27.130	27.036	27.083
3	36.010	35.923	35.966
4	44.821	44.759	44.790
5	53.572	53.414	53.493
6	62.359	62.232	62.300
7	71.162	71.098	71.130
8	79.791	79.751	79.771
9	88.292	88.371	88.332
10	97.217	97.118	97.168



对 $x_i - i$ 做线性拟合 $x_i = a + bi$:

$$\begin{aligned} a \pm \sigma_a &= (9.53 \pm 0.11)mm \\ b \pm \sigma_b &= (8.776 \pm 0.018)mm \\ r &= 0.99998 \end{aligned}$$

斜率 b 的大小即为声波波长，故

$$\begin{aligned} v &= \lambda f_0 = 352.1458m/s \\ \sigma_v &= v \sqrt{\left(\frac{\sigma_{f_0}}{f_0}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_\lambda}{\lambda}\right)^2} = 0.72m/s \end{aligned}$$

因此

$$v \pm \sigma_v = (352.15 \pm 0.72)m/s$$

4、气体参量法

(1) 温度 t

$$\begin{aligned} t &= 27.8^\circ\text{C} \\ \sigma_t &= \frac{e_t}{\sqrt{3}} = 0.58^\circ\text{C} \end{aligned}$$

(2) 压强 p

$$\begin{aligned} p &= 754.1mmHg = 1.00432 \times 10^5 Pa \\ \sigma_p &= \frac{e_p}{\sqrt{3}} = 0.058mmHg = 7.7Pa \\ p \pm \sigma_p &= (1.00432 \pm 0.00077) \times 10^5 Pa \end{aligned}$$

(3) 相对湿度

干湿表温度计读数：干表 $t_d = 23^\circ\text{C}$ 湿表 $t_w = 21^\circ\text{C}$
由表上读出相对湿度为

$$\begin{aligned} w &= 81\% \\ \sigma_w &= \frac{e_w}{\sqrt{3}} = 0.58\% \\ w \pm \sigma_w &= (81 \pm 1)\% \end{aligned}$$

(4) 声速计算

$$v = 331.45 \times \sqrt{\left(1 + \frac{t}{T}\right) \times \left(1 + \frac{0.3192p_w}{p}\right)}$$

其中 $p_w = w \times p_s$ 为水蒸气分压， p_s 为当前温度下水蒸气饱和气压。

查饱和水蒸气压与温度关系表：

温度 $t/^\circ\text{C}$	25	26	27	28	29	30
饱和蒸气压 p_s/Pa	3167.6	3361.3	3565.3	3780	4005.4	4243.3

对 p_s 和 t 的数值大小进行线性拟合 $p_s = a + bt$ 得

$$\begin{aligned} a &= (-2225.7 \pm 1.3)Pa \\ b &= (215.01 \pm 0.02)Pa/^\circ\text{C} \\ r &= 0.99931 \end{aligned}$$

可见在 $25\sim 30^\circ\text{C}$ 的范围内，可以近似认为 p_s 和 t 满足线性关系 $p_s = a + bt$ 。

因此声速的表达式可以写为

$$v = 331.45 \times \sqrt{\left(1 + \frac{t}{T}\right) \times \left(1 + \frac{0.3192w \times (a + bt)}{p}\right)} = 349.584m/s$$

$$\sigma_v = \sqrt{\left(\frac{\partial v}{\partial t} \times \sigma_t\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial w} \times \sigma_w\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial p} \times \sigma_p\right)^2} = 0.39m/s$$

所以声速为

$$v \pm \sigma_v = (349.6 \pm 0.4)m/s$$

所以有效数字位数为 4 位.

5、水中声速的测量数据（声光效应法）

(1) 共振频率 f_0

$$f_0 = 11.210MHz$$

$$\sigma_{f_0} = \frac{e_{f_0}}{\sqrt{3}} = 0.58kHz$$

$$f_0 \pm \sigma_{f_0} = (11.210 \pm 0.001)MHz$$

(2) 衍射屏到水槽中心距离 L

$$L_1 = 401.0cm, \sigma_{L_1} = 0.06cm$$

$$L_2 = 408.8cm, \sigma_{L_2} = 0.06cm$$

$$L = \frac{L_1 + L_2}{2} = 404.9cm$$

$$\sigma_L = \sqrt{\left(\frac{\sigma_{L_1}}{2}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{L_2}}{2}\right)^2} = 0.04cm$$

$$L \pm \sigma_L = (404.9 \pm 0.1)cm$$

(3) 光波波长 λ

实验使用 $He - Ne$ 激光器，波长为

$$\lambda = 632.8nm$$

(4) 衍射光斑位置

光斑级数 i	-2	-1	0	1	2
x_i/cm	-3.86	-1.95	0	1.93	3.80

对 $x_i - i$ 线性拟合 $x_i = a + bi$:

$$a = (-0.016 \pm 0.012)cm$$

$$b = (1.920 \pm 0.004)cm$$

$$r = 0.999977$$

$$\Delta x \pm \sigma_{\Delta x} = (1.920 \pm 0.004)cm$$

(5) 声速计算

声波波长 Λ

$$\Lambda = \frac{L}{\Delta x} \lambda = 1.33448 \times 10^{-4}m$$

$$\sigma_{\Lambda} = \Lambda \times \sqrt{\left(\frac{\sigma_L}{L}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{\Delta x}}{\Delta x}\right)^2} = 2.8 \times 10^{-7}m$$

$$\Lambda \pm \sigma_{\Lambda} = (1.3345 \pm 0.0028) \times 10^{-4}m$$

声速

$$v = \Lambda f_0 = 1495.96m/s$$

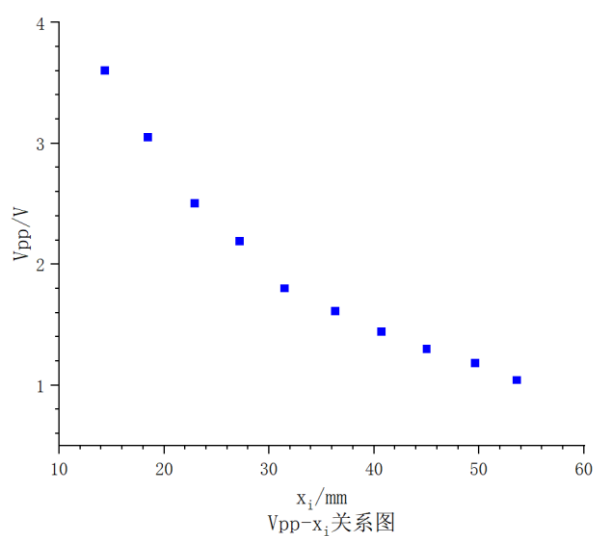
$$\sigma_v = v \times \sqrt{\left(\frac{\sigma_\Lambda}{\Lambda}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{f_0}}{f_0}\right)^2} = 3.1\text{m/s}$$

$$v \pm \sigma_v = (1496.0 \pm 3.1)\text{m/s}$$

二、分析与讨论

1、声波能量随传播距离衰减规律

平均位置 <i>i</i>	\bar{x}_i/mm	\bar{V}_{pp}/V	$\ln(\bar{V}_{pp}^2)$
1	14.362	3.60	2.562
2	18.443	3.05	2.230
3	22.908	2.50	1.832
4	27.220	2.19	1.568
5	31.514	1.80	1.176
6	36.304	1.61	0.952
7	40.700	1.44	0.729
8	45.029	1.30	0.525
9	49.616	1.18	0.331
10	53.590	1.04	0.078

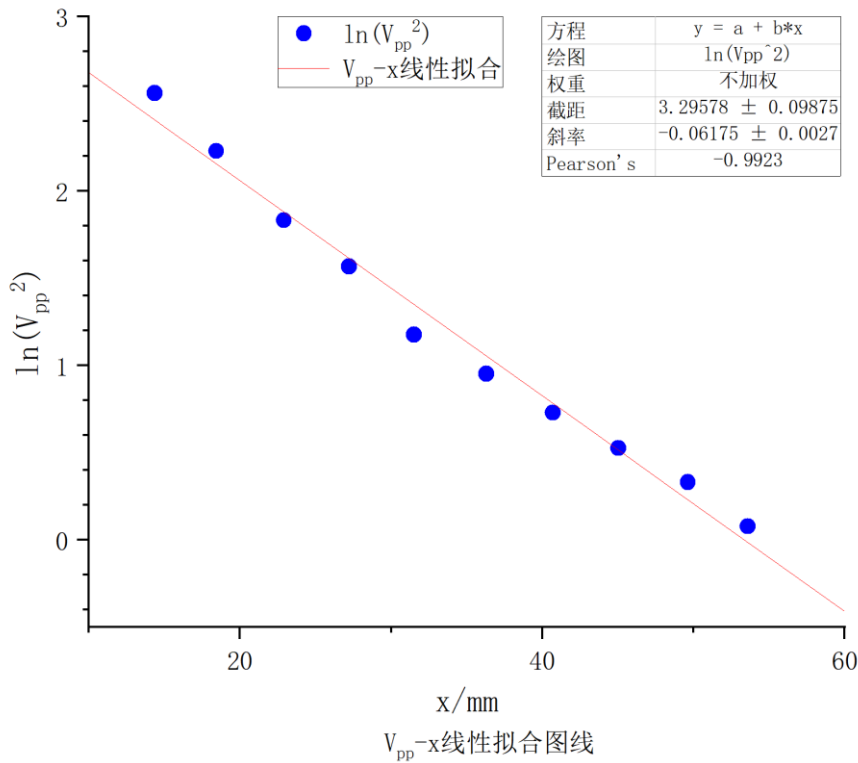


可以看到随着距离的增加，电压峰值会衰减，并且衰减的速率随距离增加会减慢，根据其物理意义推测声波能量随距离指数衰减，根据波的理论知识知道波的能量正比于振幅的平方，对 $\ln(\bar{V}_{pp}^2) - x$ 线性拟合 $\ln(\bar{V}_{pp}^2) = a + bx$ ：

$$a = 3.3 \pm 0.1$$

$$b = -0.0617 \pm 0.0027$$

$$r = 0.9923$$

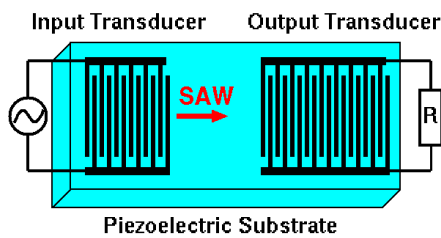


可见 $\ln(\overline{V_{pp}^2})$ 和 x 大致呈线性关系，所以声波能量随传播距离大致呈指数衰减。

2、问题调研（SAW 和 FBAR 滤波器原理）

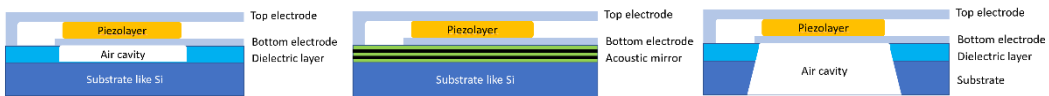
(1) SAW 滤波器 [1][2]

理论基础：声表面波（SAW）[3]：沿着介质表面或界面传播的各种模式的波；



工作原理：主体是一片具有压电特性的基片材料，在上面有两个叉指换能器（IDT）[4]，一个是发射端，负责将接收到的电信号转换为声信号，另一个是接收端，负责将接收到的声信号转化为电信号。声信号沿基片表面传播，根据基片的性质（压电性质、杨氏模量等）、形状和 IDT 的形状，基片会存在一系列振动模式，声信号从发射端发生后，经过基片的挑选，符合要求的波会被接收端接收并转换为电信号。

(2) FBAR 滤波器[5]



工作原理：基本原理与 SAW 滤波器相同，都经过：电声转换—选频滤波—声电转换，区别在于 SAW 滤波器中声波是沿着基片的表面传播的，而 FBAR 滤波器中声波在薄膜腔内传播；

三、 收获与感想

在本次实验中，用三种方法测定了空气中的声速值，并用声光效应法测定了水中的声速值。在这个过程中，我对基本实验仪器的使用方法更加熟悉，同时也学习并理解了 Ramman-Nath 衍射的原理和适用条件。

在本次实验中，我印象最深的就是虽然我们都进行了预习，知道了声光效应实验的步骤，但对于老师提出的关于 Ramman-Nath 衍射的条件的问题还是没有回答出来。实验学习应该和理论的学习一样，不仅要知其然，更要知其所以然，不能仅仅满足于知道了实验的步骤和方法。

参考文献：

1. Wikipedia contributors. (2022, July 6). Surface acoustic wave. In *Wikipedia, The Free Encyclopedia*. Retrieved 06:20, September 18, 2022, from https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Surface_acoustic_wave&oldid=1096809234
2. SAW 滤波器_百度百科 [SAW 滤波器 百度百科 \(baidu.com\)](#)
3. Lord Rayleigh (1885). "On Waves Propagated along the Plane Surface of an Elastic Solid". *Proc. London Math. Soc.* s1-17 (1): 4–11.
4. Wikipedia contributors. (2020, October 3). Interdigital transducer. In *Wikipedia, The Free Encyclopedia*. Retrieved 06:33, September 18, 2022, from https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Interdigital_transducer&oldid=981597815
5. Wikipedia contributors. (2022, August 15). Thin-film bulk acoustic resonator. In *Wikipedia, The Free Encyclopedia*. Retrieved 06:40, September 18, 2022, from https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Thin-film_bulk_acoustic_resonator&oldid=1104507086