

超声光栅

作者：张积翔 学号：PB23020595

摘要：

本实验通过搭建声场光栅和超声光栅实验装置，观察声场光栅结构和超声光栅的拉曼-奈斯衍射现象，并分别在两种情况下测量声波在水中的传播速度为 $1532.43 \pm 1.27\text{m/s}$ 和 $1456.06 \pm 3.37\text{m/s}$ 。

关键词：声光效应；超声光栅；声速测量；拉曼-奈斯衍射

1. 引言

1922 年，布里渊在理论上预言了当高频声波在液体中传播时，如果有可见光通过该液体，声波对可见光会产生衍射效应，这一预言在 10 年后的实验中观察验证。声光学在近年来获得了很大的发展，新声光材料及高性能声光器件的设计和制造工艺都得到迅速发展，并研制成功了声光调制器、声光偏转器和可调谐滤光器等声光器件。

当超声波在盛有液体的玻璃槽中传播时，液体被周期性地压缩或膨胀，其密度会发生周期性的变化，形成疏密波。稀疏作用会使液体密度减小、折射率减小，压缩作用会使液体密度增大、折射率增大。因此液体密度的周期性变化，必然导致其折射率也相应地作周期性变化。当光通过这种液体时，就相当于通过一个透射光栅，因而会发生衍射，这种衍射称为“声光效应”。存在声波场的介质则称为“声场光栅”；当采用超声波时，通常就称为“超声光栅”。

利用声场光栅和超声光栅拉曼-奈斯衍射的实验现象，可以通过测量计算间接得到声波在液体中的传播速度。

2. 实验原理

2.1 实验仪器

半导体激光器、扩束透镜、玻璃水槽、刻度屏、光学导轨、超声换能器、信号发生器 DHSG-1、信号发生器 DHSG-2

2.2 实验原理

2.2.1 声光效应与声场光栅

当声波在介质中传播时，其声压会造成介质的局部压缩和伸长而产生弹性应变，而且该应变随时间和空间作周期性变化，并且导致介质的折射率也发生相应的变化。此时，如有平行单色光沿垂直于超声波传播方向通过介质时，就会产生衍射现象，这一作用类似光栅，称为声光效应。

若声波在传播的过程中遇到反射，如果介质在 Y 方向的高度 h 正好是超声波半波长的整数倍，在受到反射后就在介质中产生叠加形成驻波场。在以液体为介质的驻波场中，声波传播方向 y 的折射率 n 为：

$$n = n_0 + 2A \sin ky \cdot \cos \omega t$$

其中 $A = \frac{1}{2} n^3 \rho S_0$ 。因此液体折射率的空间变化间距正好为声波的波长，介质内部疏密层次的空间变化间距也为声波的波长。介质密的地方形成阻光层，光疏处形成透光层，声场光栅形成，此时，平面的光波波阵面变成褶皱波阵面。

2.2.2 超声光栅与拉曼-奈斯衍射

在超声波的频率较高时，当光通过超声传播区域时会产生与正常光栅一样的衍射现象，常称为超声光栅。

当超声波的频率不是很高（10 MHz 左右），光波平行于声波面入射（即垂直于声场传播方向），声光互作用长度较短时，在光波通过介质的时间内，折射率的变化可以忽略不计，声光作用的距离满足 $2\pi\lambda L \ll \Lambda^2$ （ Λ 为超声波的波长， λ 为光波的波长）时，声光介质可近似看做为相对静止的“平面位相光栅”，产生拉曼-奈斯衍射。

对于拉曼-奈斯衍射，其衍射规律与平行光通过平面透射光栅产生的衍射相似，符合以下所示的光栅方程：

$$\Lambda \sin \theta = K\lambda$$

其中 Λ 为超声波的波长， θ 为衍射角，K 为衍射波级数， λ 为光波波长。

2.2.3 利用声场光栅测量液体声速

声场光栅就是超声波波阵面轮廓成像。由于光波波阵面变成褶皱波阵面，通光的能力随褶皱波阵面产生周期性的变化，其图形是明暗相间等间距的分布条纹，是超声波对光调制の結果。

由 2.2.1 分析知，该条纹的间距就是超声波的波长。搭建如图 1 所示的实验装置来测量液体声速。

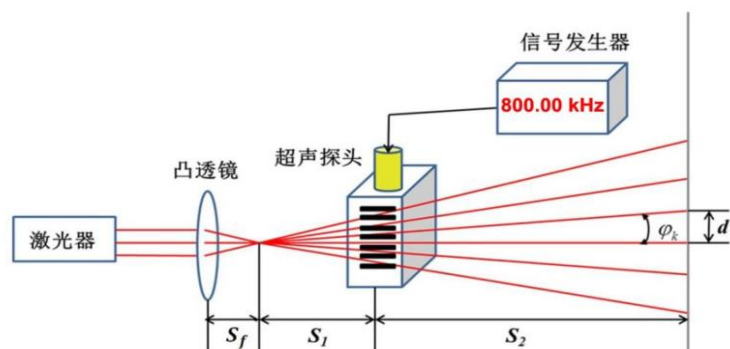


图 1：声场光栅实验装置

如果相邻两条纹之间的距离为 d ，超声波频率为 f ， Λ 为超声波的波长，可以利用相似三角形的原理得到液体中声速为：

$$v = \Lambda f = \frac{2dS_1}{S_1 + S_2} f$$

2.2.4 利用超声光栅拉曼-奈斯效应测量液体声速

在上述实验的基础上，提高超声波的频率到 10 MHz 左右，取下凸透镜，采用图 2 的实验方案，就可以观察到拉曼-奈斯衍射图像。

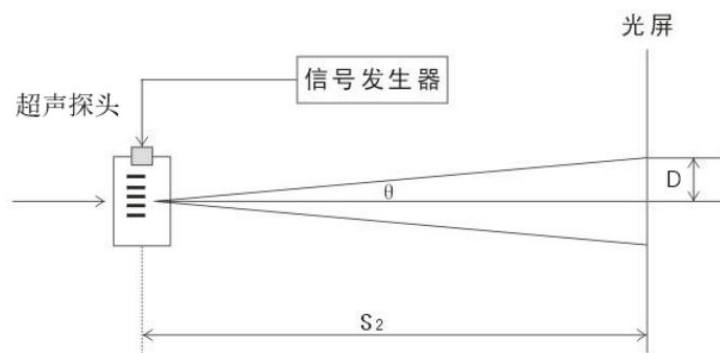


图 2：超声光栅实验装置

根据光栅方程 $\Lambda \sin \theta = K\lambda$ ，当角度 θ 很小的时候，可以近似地利用 $\sin \theta \approx \frac{D}{S_2}$

得到液体声速：

$$v = \Lambda f = \frac{K\lambda S_2}{D} f$$

3. 实验内容与步骤

3.1 观察声场光栅结构并测量水中声速

首先搭建图 1 的声场光栅实验装置：

打开激光发生器，调整激光为平行光且与光学导轨平行。将玻璃水槽中盛入去离子水，将超声换能器浸入水中 3-5 毫米深处，调整固定架上两颗螺钉，目测超声换能器平行

于水槽底部。调整激光发生器，使激光通过超声换能器正下方，并且靠近玻璃水槽中心，安装凸透镜，根据光斑中心位置调整凸透镜，使激光通过凸透镜的光心。利用凸透镜将入射的平行激光束形成点光源，调节凸透镜与水槽的中心距离在 200mm 左右，水槽中心与投射屏之间的距离在 600mm 左右。打开信号发生器 DHSG-1，观察水槽中的液体在超声波作用下产生的水波链。调节信号发生器的发射强度、频率以及换能器的水平位置，在光屏上观察到清晰的光栅投影条纹，测量并记录数据。在记录数据前后，使用温度计分别测量水温。改变透镜、水槽、光屏的相对位置，根据需要调整信号发生器的发射强度、频率以及换能器的水平位置，完成 3 次测量。

利用测量数据的计算水中声速，并与理论值进行对比。

3.2 观察超声光栅拉曼-奈斯衍射现象并计算水中声速

搭建图 2 的超声光栅实验装置：

打开激光发生器，调整激光为平行光且与光学导轨平行。将玻璃水槽中盛入去离子水，将超声换能器浸入水中 3-5 毫米深处，调整固定架上两颗螺钉，目测超声换能器平行于水槽底部。调整激光发生器，使激光通过超声换能器正下方，并且靠近玻璃水槽中心。打开信号发生器 DHSG-2，调节换能器的水平位置以及信号发射频率，使光屏上显示清晰的点状衍射条纹，至少能看到±5 级衍射条纹，测量并记录数据。记录数据前后，使用温度计分别测量水温。

利用测量数据计算水中声速，并与理论值进行对比。

4. 实验结果与分析

4.1 声场光栅及水中声速测量

实验测得的原始数据记录如下

表 1：声场光栅实验数据

组次	f (kHz)	$S_1 + S_f$ (mm)	S_2 (mm)	D (mm)	n
1	800.90	151.5	561.0	19.6	4
2	805.89	201.0	596.0	28.0	7
3	816.49	177.0	596.0	26.5	6

其中，n 为测量条纹间隔数，D 为 n 条间隔的距离。测得实验开始时水温 $t_1 = 25.2^{\circ}\text{C}$ ，结束时水温 $t_2 = 26.0^{\circ}\text{C}$ 。

透镜焦距 $S_f = 16\text{mm}$ ，根据 $d = \frac{D}{n}$ ， $\Lambda = \frac{2dS_1}{S_1 + S_2}$ 对实验数据处理如下表：

表 2：声场光栅数据处理

组次	d (mm)	S_1 (mm)	Λ (mm)	v (m/s)
1	4.90	135.5	1.907	1526.9
2	4.00	185.0	1.895	1527.2
3	4.42	161.0	1.880	1535.1

所以测得水中声速的平均值为：

$$\bar{v} = (v_1 + v_2 + v_3) \div 3 = (1526.9\text{m/s} + 1527.2\text{m/s} + 1535.1\text{m/s}) \div 3 = 1532.43\text{m/s}$$

平均水温 $t = (t_1 + t_2) \div 2 = (25.2^\circ\text{C} + 26.0^\circ\text{C}) \div 2 = 25.6^\circ\text{C}$ ，因此声波在水中传播速度的理论值为：

$$v = 1577 - 0.0245 \times (74 - t)^2\text{m/s} = 1577 - 0.0245 \times (74 - 25.6)^2\text{m/s} = 1499.61\text{m/s}$$

由此可得水中声速的相对误差为：

$$\Delta = \frac{|\bar{v} - v|}{v} \times 100\% = \frac{|1532.43 - 1499.61|}{1499.61} \times 100\% = 2.19\%$$

不确定度及误差分析：

水中声速平均值为 $\bar{v} = (v_1 + v_2 + v_3) \div 3$ ，故 $u_c(\bar{v}) = \frac{1}{3}\sqrt{u^2(v_1) + u^2(v_2) + u^2(v_3)}$ 。

n 条间隔的距离为 D ，钢板尺的最大允差为 0.10mm，其标准不确定度为 $u(D) = 0.10\text{mm} \div 3 = 0.033\text{mm}$ 。

同理，对于光学导轨的测量数据 S ，光学导轨的最大允差为 0.20mm，其标准不确定度为 $u(S) = 0.20\text{mm} \div 3 = 0.067\text{mm}$ 。

对于信号发生器 DHSG-1 的频率 f ，信号发生器 DHSG-1 的最大允差为 0.4kHz，其标准不确定度为 $u(f) = 0.4\text{kHz} \div 3 = 0.133\text{kHz}$ 。

因为 $v = \Lambda f = \frac{2DS_1}{n(S_1 + S_2)}f$ ，因此单次测量水中声速的不确定度为：

$$u(v) = \sqrt{u^2(D)\left(\frac{v}{D}\right)^2 + u^2(f)\left(\frac{v}{f}\right)^2 + u^2(S_1)\left(\frac{vS_2}{(S_1 + S_2)S_1}\right)^2 + u^2(S_2)\left(\frac{v}{S_1 + S_2}\right)^2}$$

$$= v \sqrt{\left(\frac{u(D)}{D}\right)^2 + \left(\frac{u(f)}{f}\right)^2 + \left(\frac{u(S_1)S_2}{S_1(S_1 + S_2)}\right)^2 + \left(\frac{u(S_2)}{S_1 + S_2}\right)^2}$$

分别将表 1 中组次 1、2、3 的数据代入 $u(v)$ 表达式中可以得到：

$$u(v_1) = 1526.9 \sqrt{\left(\frac{0.033}{19.6}\right)^2 + \left(\frac{0.133}{800.90}\right)^2 + \left(\frac{0.067 \times 561.0}{135.5 \times (561.0 + 135.5)}\right)^2 + \left(\frac{0.067}{561.0 + 135.5}\right)^2} \text{m/s} = 2.66\text{m/s}$$

$$u(v_2) = 1527.2 \sqrt{\left(\frac{0.033}{28.0}\right)^2 + \left(\frac{0.133}{805.89}\right)^2 + \left(\frac{0.067 \times 596.0}{185.0 \times (596.0 + 185.0)}\right)^2 + \left(\frac{0.067}{596.0 + 185.0}\right)^2} \text{m/s} = 1.87\text{m/s}$$

$$u(v_3) = 1535.1 \sqrt{\left(\frac{0.033}{26.5}\right)^2 + \left(\frac{0.133}{816.49}\right)^2 + \left(\frac{0.067 \times 596.0}{161.0 \times (596.0 + 161.0)}\right)^2 + \left(\frac{0.067}{596.0 + 161.0}\right)^2} m/s = 2.00 m/s$$

因此水中声速的合成不确定度为

$$u_c(\bar{v}) = \frac{1}{3} \sqrt{u^2(v_1) + u^2(v_2) + u^2(v_3)} = \frac{1}{3} \sqrt{2.66^2 + 1.87^2 + 2.00^2} m/s = 1.27 m/s$$

造成测量值与理论值误差的可能原因有：钢板尺、光学导轨仪器误差与人为读数的误差，信号发生器频率的误差，扩束透镜焦距的误差，实验前后温度处于一个区间而使声速理论值计算产生的误差。

综上所述，利用声场光栅测量水中声速得到的水中声速为 $1532.43 \pm 1.27 m/s$ ，相对误差为 2.19%。

4.2 利用超声光栅拉曼-奈斯现象测量水中声速

实验测得原始数据如下

表 3：超声光栅实验数据

K	D (mm)	$\Lambda = \frac{K\lambda S_2}{D}$ (mm)	$v = \Lambda f$ (mm)
+5	12.4	0.1526	1436.5
+4	10.0	0.1514	1425.0
+3	7.6	0.1494	1406.2
+2	5.0	0.1514	1425.0
+1	2.5	0.1514	1425.0
-1	-2.4	0.1577	1484.4
-2	-4.8	0.1577	1484.4
-3	-7.1	0.1599	1505.3
-4	-9.6	0.1577	1484.4
-5	-12.0	0.1577	1484.4

信号发生器频率 $f=9413\text{kHz}$ ， $S_2 = 596.0\text{mm}$ ，测得实验开始时水温 $t_1 = 24.9^\circ\text{C}$ ，结束时水温 $t_2 = 25.2^\circ\text{C}$ 。

数据处理可得水中声速测量值的平均值为

$$\bar{v} = \sum_k v_k = 1456.06 m/s$$

平均水温 $t = 25.1^\circ\text{C}$ ，得声波在水中传播速度理论值为：

$$v = 1577 - 0.0245 \times (74 - t)^2 m/s = 1577 - 0.0245 \times (74 - 25.1)^2 m/s = 1498.42 m/s$$

因此水中声速的测量误差为：

$$\Delta = \frac{|\bar{v} - v|}{v} \times 100\% = \frac{|1456.06 - 1498.42|}{1498.42} \times 100\% = 2.83\%$$

不确定度与误差分析：

由于 $\bar{v} = \sum_k v_k$ ，故 $u_c(\bar{v}) = \frac{1}{10} \sqrt{\sum_k u(v_k)^2}$ 。

因为所用光学导轨与钢板尺与声场光栅实验相同，故其标准不确定度也相同，即 $u(D) = 0.033mm$ ， $u(S_2) = 0.067mm$ 。对于信号发生器 DHS-2 的频率，信号发生器 DHS-2 的最大允差为 20kHz，其标准不确定度为 $u(f) = 20kHz \div 3 = 6.7kHz$ 。

由于 $v_k = \frac{K\lambda S_2 f}{D}$ ，所以

$$\begin{aligned} u(v_k) &= v_k \sqrt{\left(\frac{u(D)}{D}\right)^2 + \left(\frac{u(f)}{f}\right)^2 + \left(\frac{u(S_2)}{S_2}\right)^2} \\ &= v_k \sqrt{\left(\frac{0.033mm}{D}\right)^2 + \left(\frac{6.7kHz}{9413kHz}\right)^2 + \left(\frac{0.067mm}{596.0mm}\right)^2} \end{aligned}$$

代入不同 k 对应的 v_k 和 D 得到对应的 $u(v_k)$ ：

表 4：不同 K 对应的 $u(v_k)$

K	+1	+2	+3	+4	+5
$u(v_k)$	18.84	9.46	6.19	4.81	3.96
K	-1	-2	-3	-4	-5
$u(v_k)$	20.44	10.26	7.08	5.21	4.22

因此水中声速的合成不确定度为：

$$\begin{aligned} u_c(\bar{v}) &= \frac{1}{10} \sqrt{\sum_k u(v_k)^2} \text{ m/s} \\ &= \frac{1}{10} \sqrt{18.84^2 + 9.46^2 + 6.19^2 + 4.81^2 + 3.96^2 + 20.44^2 + 10.26^2 + 7.08^2 + 5.21^2 + 4.22^2} \\ &= 3.37 \text{ m/s} \end{aligned}$$

造成测量值与理论值误差的可能原因有：钢板尺、光学导轨仪器误差与人为读数的误差，信号发生器频率的误差，实验前后温度处于一个区间而使声速理论值计算产生的误差，测量值公式中用 $\tan\theta$ 近似 $\sin\theta$ 产生的误差。

综上所述，利用超声光栅拉曼-奈斯效应测量得到的水中声速为 $1456.06 \pm 3.37 \text{ m/s}$ ，相对误差为 2.83%。

5. 结论

本实验通过搭建声场光栅和超声光栅实验装置，分别观察了声场光栅结构和超声光栅的拉曼-奈斯效应，并通过两种方法分别得到了声波在水中的传播速度为 $1532.43 \pm 1.27\text{m/s}$ 和 $1456.06 \pm 3.37\text{m/s}$ ，同时根据测量实验时的温度得到水中声速的理论值，比较得到两实验测得的水中声速的相对误差分别为 2.19%和 2.83%。

6. 思考题

1. 实验中为什么要使用两个不同的超声换能器？

两次实验中使用的超声波频率分别在 800kHz 左右和 10MHz 左右，频率相差较大，而超声换能器只有在固有频率附近工作才能有较大的转换效率，因此需要使用两种不同的超声换能器。

2. 实验过程中水温发生了什么变化，为什么？

实验过程中水温逐渐升高，因为超声波的机械能部分转化为水的内能。

7. 参考文献

- [1]. 声光效应与实验讲义. 实验讲义. 2024
- [2]. 测量的不确定度与数据处理方法. 实验讲义. 2024
- [3]. 赵凯华, 钟锡华. 光学: 重排版. 北京: 北京大学出版社, 2017. 10

附录：老师签字的原始数据

张和翔

PB23020595

物理实验教学中心 大学物理综合实验

附录 2：《声光效应与超声光栅》实验数据处理参考模板

1. 声场光栅及水中声速测量

a) 原始数据记录表格：

组次	f (kHz)	$S_1 + S_f$ (mm)	S_2 (mm)	D (mm)	n
1	800.90	151.5	561.0	19.6	4
2	805.89	201.0	596.0	28.0	7
3	816.49	177.0	596.0	26.5	6

其中：n (测量条纹间隔数)；D (n 条间隔的距离)

开始水温： $t_1 = 25.2^\circ\text{C}$ ，结束水温： $t_2 = 26.0^\circ\text{C}$

b) 数据处理表格：

组次	d (mm)	S_1 (mm)	Λ (mm)	v (m/s)
1	4.90	135.5	1.907	1526.9
2	4.00	185.0	1.895	1527.2
3	4.42	161.0	1.880	1535.1

$\bar{v} = 1532.43 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

平均水温： $t = 25.6^\circ\text{C}$

声波在水中传播速度的理论值： $v = 1499.61 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

相对误差 (写出计算过程)：

$$\left| \frac{1532.43 - 1499.61}{1499.61} \right| \times 100\% = 2.19\%$$

2. 超声光栅拉曼-奈斯衍射及水中声速测量

$f = 9413$ (kHz) $S_2 = 596.0$ (mm)

开始水温： $t_1 = 24.9^\circ\text{C}$ ，结束水温： $t_2 = 25.2^\circ\text{C}$

K	D(mm)	$\Lambda = K\lambda \frac{S_2}{D}$ (mm)	$v = \Lambda f$ (m/s)
+5	12.4	0.1526	1436.5
+4	10.0	0.1514	1424.5.0
+3	7.6	0.1494	1406.2
+2	5.0	0.1514	1425.0
+1	2.50	0.1514	1425.0
-1	-2.4	0.1577	1484.4

张积翔

PB23020595

物理实验教学中心 大学物理综合实验

-2	-4.8	0.1577	1484.4
-3	-7.1	0.1599	1505.3
-4	-9.6	0.1577	1484.4
-5	-12.0	0.1577	1484.4

$$\bar{v} = 1456.06 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$$

平均水温: $t = 25.5^\circ\text{C}$

声波在水中传播速度的理论值: $v = 1498.42 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

相对误差 (写出计算过程):

$$|1456.06 - 1498.42| \div 1498.42 \times 100\% = 2.83\%$$

3. 思考题

1. 实验中为什么使用两个不同的超声换能器?

两次实验中使用的超声波频率分别在800kHz左右和10MHz左右,频率相差较大,又因为超声换能器在固有频率附近工作才能有较大转换效率,故使用不同换能器。

2. 实验过程中水温逐渐升高,因为超声波机械能转换为水的内能。

李振清

2024.10.14