

## 实验须知

### 1. 预习阶段

- (1) 认真阅读实验讲义。可查阅与实验相关的资料。预习后不需要写预习报告。
- (2) 在实验教学平台完成预习思考题 【即：进门测】作为预习分。

### 2. 实验阶段

- (1) 维护良好的课堂秩序，在实验室内尽量保持安静。
- (2) 维护整洁的实验环境，不要将水杯、饮料等放在实验台上，不得在实验室内吃东西。
- (3) 爱护实验设备，轻拿轻放。在老师讲解后才能动手操作。并且在动手前应仔细阅读实验注意事项和操作说明。
- (4) 如实记录实验数据，不得篡改、抄袭。
- (5) 本系列实验不需写完整实验报告，实验结束后课堂直接交测量数据和计算结果（参考讲义中的附录：实验数据处理参考模板）即可。
- (6) 实验数据经指导老师签字、实验设备整理好，填写完成出门测，方可离开实验室。

### 3. 实验成绩，共 100 分。

预习测 10 分，出门测 5 分，实验操作与数据处理 85 分。

# 声光效应与超声光栅

近年来声光学作为一门新兴的边缘学科，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，声光相互作用又重新引起人们的注意。

利用超声对光的衍射是声光学领域最早进行的具有代表性的实验。1922 年，布里渊(L.Brillouin)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（1932）被美国的 P.J.W.德拜和 F.W.席尔斯以及法国的 R.卢卡斯和 P.比夸特分别独立在实验中观察到。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”。

超声光栅是一种可擦除的实时光栅，它的光栅常数和位相调制深度可以通过超声波的频率和振幅来控制。利用声光衍射效应制成的器件，称为声光器件。声光器件能快速有效地控制激光束的强度、方向和频率，还可把电信号实时转换为光信号。此外，声光衍射还是探测材料声学性质的主要手段。

本实验利用声光效应与超声光栅的物理现象，进行在介质液体中的声速测量。

## 【实验目的】

1. 了解声光效应的原理，理解声场光栅的形成机制；
2. 利用声光效应演示声场光栅和超声光栅实验现象；
3. 掌握利用声场光栅和超声光栅测量声波在液体中传播速度的方法。

## 【实验原理】

### 1. 声光效应与声场光栅的形成

当超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，称为超声致光衍射，亦称为声光效应。

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，有：

$$U(Y,t) = 2U_0 \cos k_s y \bullet \cos \omega_s t \quad (1)$$

理论证明它使得介质在 Y 方向上偏离平衡位置的应变为：

$$S = 2S_0 \sin k_s y \bullet \cos \omega_s t \quad (2)$$

可见驻波的作用可以成倍的引起振幅应变的变化，所以要使实验现象明显，本实验应在驻波声场中进行。

介质的应变 S 引起介质的折射率发生相应的变化，它们的关系可以表示为：

$$\Delta\left(\frac{1}{n^2}\right) = \rho S \quad (3)$$

其中  $n$  是介质的折射率， $\rho$  是应变引起的  $\frac{1}{n^2}$  的光弹系数，通常  $\rho$  和  $S$  都是二阶张量。在诸如水这样的各向同性的介质中传播时， $\rho$  与  $S$  都可作为标量处理，对于驻波声场：

$$\Delta n = -\frac{n^3}{2} \rho S = -n^3 \rho S_0 \sin k_s y \bullet \cos \omega_s t = -2A \sin k_s y \bullet \cos \omega_s t \quad (4)$$

公式中  $A = \frac{1}{2} n^3 \rho S_0$  为超声波引起介质的折射率变化的幅值，这样在声波传播的 Y 方向上，折射率是以：

$$n(y) = n_0 + \Delta n = n_0 + 2A \sin k_s y \bullet \cos \omega_s t \quad (5)$$

的规律发生变化，使介质内部疏密层次也发生相应的变化。

由于驻波的振幅可以达到单一行波的两倍，加剧了波源与反射面之间的液体的疏密变化程度。设某一时刻，纵驻波的任一波节两边的质点都涌向这个节点，使得该节点附近成为质点密集区，而相邻的波节处就变成了质点稀疏区；半个周期后，这个节

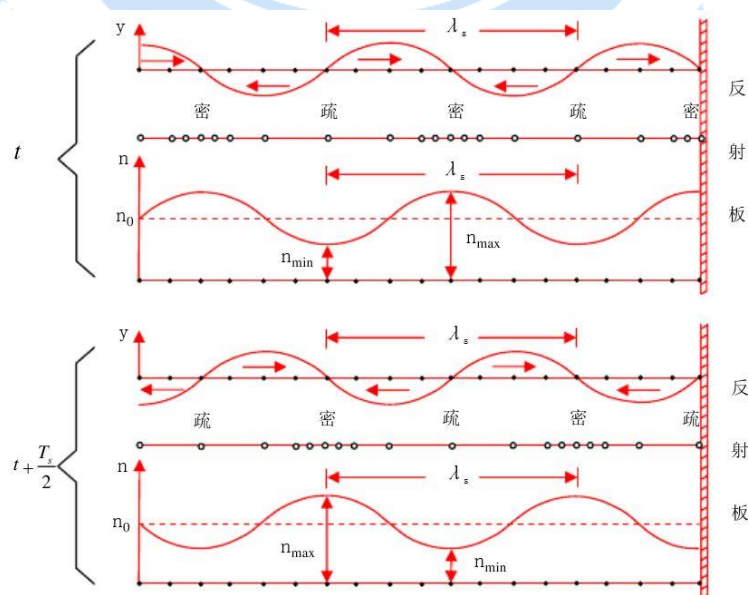


图 1：声场光栅原理图

点附近的质点又向两边散开变为稀疏区，相邻波节处变为密集区。因此在振动过程中相邻节点光密与光疏交替排列，每隔半个周期交替变化，而同一时刻相邻波节附近的密集与稀疏正好相反。在驻波存在区域中，稀疏作用使得液体折射率减小，而压缩作用使得液体折射率增大。在距离等于波长的两点，液体的密度相同，折射率也相等，上述状态下的液体相当于一个平面光栅（位相光栅），如图 1 给出了声场光栅原理图。显见液体密度的空间变化间距正好为超声波之波长，用  $\Lambda$  表示。

当单色平行光沿着垂直于超声波传播方向通过液体时，因为光速远大于液体中的声速（ $\sim 10^5$  倍），可以认为光波的波阵面通过液体的过程中，液体中的疏密及折射率的周期性变化情况没有明显改变，相对稳定，即液体在空间的分布可以认为是静止的。因此在光通过液体时，因折射率的周期性变化将使光波在原先的波阵面上产生了相应的周期性变化的位相差，而光的振幅不变。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，如图 2 所示。此时，平面的光波波阵面变成褶皱波阵面。

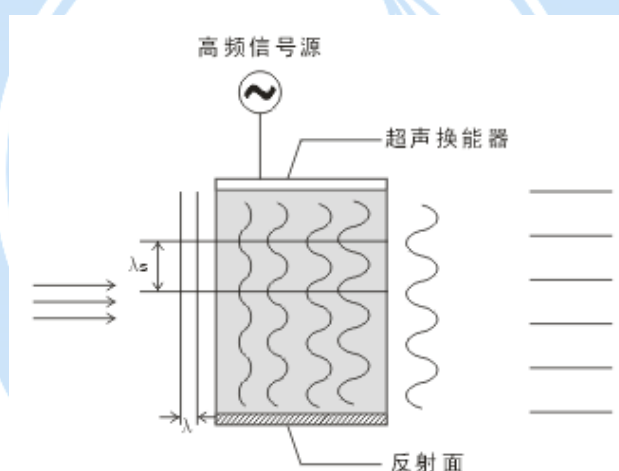


图 2 声场光栅

## 2. 超声光栅

在超声波的频率较高时（即  $\Lambda$  较小），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。

按照声波频率的高低以及声波和光波作用长度的不同，声光相互作用可以分为拉曼-奈斯 (Raman-Nath) 衍射和布喇格 (Bragg) 衍射两种类型。

### 2.1 拉曼-奈斯衍射：

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  $2\pi\lambda L \ll \Lambda^2$ （ $\Lambda$  为超声波的波长， $\lambda$  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。由于声速比光速小得多，而且声波长比光波长得多，当光波平行通过介质时，几乎不通过声波面，因此只受到相位调制，即通过光密（折射率大）部分的光波波阵面将推迟，而通过光疏（折射率小）部分的光波波阵面将超前，于是通过声光介质的平面波波阵面出现凹凸现象，变成一个折皱曲面。由出射波阵面上各子波源发出的次波将发生相干作用，形成与入射方向对称分布的多级衍射光，这就是拉曼-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：

$$\Lambda \sin \theta = K\lambda \quad K=0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (6)$$

其中  $\Lambda$  为超声波之波长， $\theta$  为衍射角， $K$  为衍射波级数， $\lambda$  为光波波长。

## 2.2 布喇格衍射：

当声波频率高与或等于 100 MHz，而超声液体槽的厚度  $L$  较长，且满足  $2\pi\lambda L \gg \Lambda^2$  条件时，声波作用长度较大，而且入射光束相对于声波波面间以一定的入射角  $i$  斜入射时，且入射角  $i$  满足  $\sin i = \lambda/2\Lambda$  时，光波在介质中要穿过多个声波面，在理想情况下，除了 0 级非衍射光外，只出现 +1 级或 -1 级衍射光，这种衍射与晶体对 X 光的布喇格衍射很类似，此时介质具有“体光栅”的性质，所以称为布喇格衍射。因此，若能合理选择参数，并使超声场足够强，可使入射光能量几乎全部转移到 +1 级（或 -1 级）衍射极值。因而光束能量可以得到充分利用，所以利用布喇格衍射效应制成的声光器件可以获得较高的效率。

## 3. 观察声场光栅结构，并测量液体中声速

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，是超声波对光调制的结果，其图像如图 3。

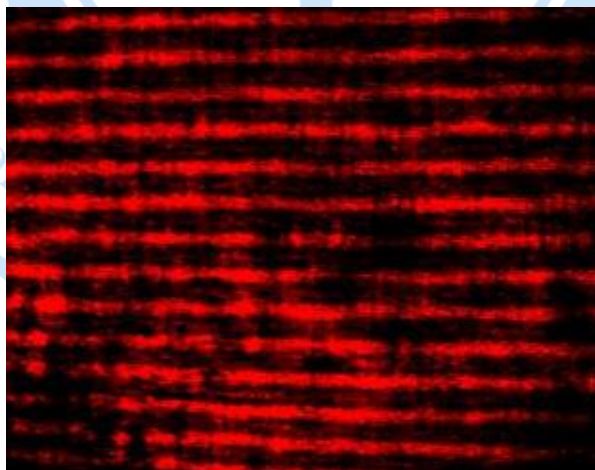


图 3 声场光栅图像

实验装置如图 4。为了方便实验的操作，超声波的频率选择在 800 KHz 左右。由实验原理分析可以知道该条纹的间距，就是超声波的波长。

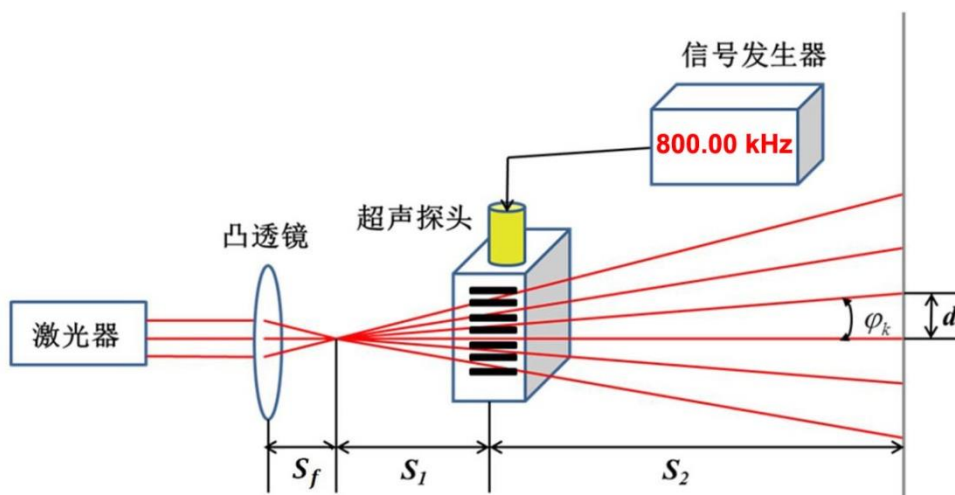


图 4 声场光栅实验装置

利用该现象可以测量在介质中的声速。如果相邻两条纹之间的距离为 $d$ ，可以利用相似三角形的原理得到：

$$\Lambda = \frac{2dS_1}{S_1 + S_2} \quad (7)$$

如果 $f$ 为超声波的频率，可以得到液体中声速为：

$$v = \Lambda f = \frac{2dS_1}{S_1 + S_2} f \quad (8)$$

也可从驻波形成的原理来进行测量。从驻波形成的公式来分析， $D = n \cdot \frac{\Lambda}{2}$ 时，入射波与反射波形成驻波。固定 $D$ 为确定值时，调节信号源频率可以在声光介质中形成不同的驻波振动， $\Lambda(f)$ 的大小与 $n$ 值有关。当激光束以垂直声场的方向入射时，在超声头频率响应带宽 $\Delta f$ 范围内，调节 $f$ 的大小，根据公式 $D = n \cdot \frac{\Lambda}{2}$ 可以找到多个形成条纹像相对应的 $f$ 值，因此可以通过光栅图像形成点判断 $n$ 值的变化。

因 $\Lambda = \frac{v}{f}$ ，则 $f = \frac{nv}{2D}$ ，对该公式取微分，即

$$df = dn \frac{v}{2D} \quad (9)$$

如果令 $dn = 1$ ，则：

$$df = \frac{v}{2D} \text{ 或 } v = 2D\Delta f \quad (10)$$

这里 $\Delta f$ 为相邻两次出现光栅图像的频率差，如果能测量出 $D$ 的长度，再通过频率计读出精确测定的大小，就能进而求出声速。

#### 4. 利用超声光栅拉曼-奈斯衍射测量液体中声速

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 5 的实验方案，就可以观察到衍射图像。该实验属于拉曼-奈斯衍射。

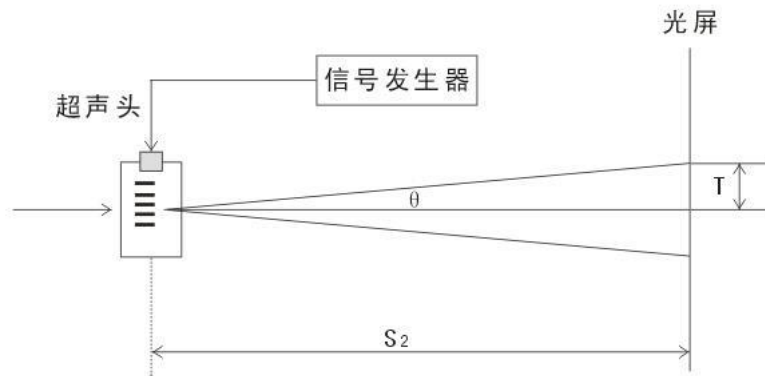


图 5 超声光栅实验装置

根据公式  $\Lambda \sin \theta = K\lambda$ ，由于角度  $\theta$  很小，实验中如能测量出屏与水槽之间的距离  $S_2$ ，以及 0 级到  $K$  级条纹的间距  $T$ ，则由公式可得：

$$\Lambda = \frac{K\lambda}{\sin \theta} \quad (11)$$

当角度  $\theta$  很小的时候，可以近似地利用  $\sin \theta \approx \tan \theta = \frac{T}{S_2}$  得出：

$$\Lambda = \frac{K\lambda S_2}{T} \quad (12)$$

如果知道声波频率  $f$ ，则声速：

$$v = \Lambda f = \frac{K\lambda S_2}{T} f \quad (13)$$

### 【实验器材】

1. 半导体激光器，供电电压 5V，功率 2.5 mW，波长 635 nm。
2. 扩束透镜，焦距 16 mm。
3. 玻璃水槽（100 mm×80 mm×50 mm）：  
水采用去离子水，如果水质较差，会有杂质，影响光的透明度。
4. 刻度屏：标有毫米刻度。
5. 光学导轨，光学固定架。
6. 800 KHz 超声换能器（频率 800 KHz 左右，金属封装）；  
10 MHz 超声换能器（频率 10 MHz 左右，有机玻璃封装）。
7. 信号发生器 DHSG-1：  
DDS 信号发生器，频率 500.00 KHz-990.00 KHz 连续可调，分辨率 0.01 KHz，  
用于驱动 800 KHz 换能器（**金属封装**）。左右旋转频率调节旋钮来改变频率大小，单击频率调节旋钮来改变需要调节的频率位。
8. 信号发生器 DHSG-2：  
DDS 信号发生器，频率 7000 KHz-12000 KHz 连续可调，分辨率 1 KHz，用

于驱动 10 MHz 换能器（有机玻璃封装）。左右旋转频率调节旋钮来改变频率大小，单击频率调节旋钮来改变需要调节的频率位。

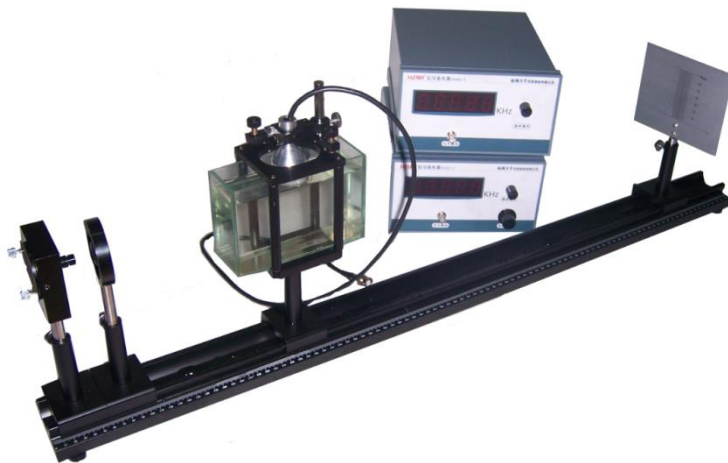


图 6 声光效应与超声光栅实验仪

### 【实验内容】

#### 1. 观察声场光栅结构，并测量水中声速：

利用声场光栅超声换能器（频率 800 kHz 左右，金属封装），根据图 4 搭建实验光路，调节至波阵面轮廓成像清晰，测试相关数据后，利用公式 8 进行声速计算，并与理论值对比（声波在水中传播速度的理论值： $v = 1557 - 0.0245 \times (74 - t)^2 \text{ m/s}$ ，其中  $t$  为水的温度）。

- (1) 打开激光发生器，根据激光束，使激光、凸透镜和玻璃水槽三者同轴。
- (2) 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，使超声换能器平行于水槽底部。
- (3) 利用凸透镜将入射的平行激光束散射。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。
- (4) 打开信号发生器 DHS-1，仔细观察水槽中的液体在超声波作用下产生的水波链。
- (5) 调节发射强度、频率以及超声换能器，在光屏上观察到清晰的光栅投影条纹。测量并记录数据。
- (6) 使用温度计测量水温。
- (7) 改变透镜、水槽、光屏的相对位置，完成 3 次测量。

#### 2. 观察超声光栅拉曼-奈斯衍射现象，并测量水中声速：

利用超声光栅超声换能器（频率 10 MHz 左右，有机玻璃封装），根据图 5 搭建实验光路，调节出至少  $\pm 3$  级衍射点，测试相关数据后，根据公式 13 计算声速，并与理论值对比（声波在水中传播速度的理论值： $v = 1557 - 0.0245 \times (74 - t)^2 \text{ m/s}$ ，其中  $t$  为水的温度）。

- (1) 打开激光发生器，根据激光束，使激光与导轨平行。



- (2) 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，使超声换能器平行于水槽底部。
- (3) 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 $\pm 3$  级衍射条纹，测量并记录数据。
- (4) 使用温度计测量水温。

### 【思考题】

1. 影响条纹清晰程度的因素有哪些？
2. 实验测量中对声速测量结果的影响主要有哪几方面因素？

### 【参考资料】

1. 沙振舜，周进，周非.《当代物理实验手册》[M]，南京：南京大学出版社，2012.
2. 李相银.《大学物理实验》[M]，北京：高等教育出版社，2004.

(郭玉刚 汪启昕 曲广媛，2022 年秋季学期)

## 附录 1:《声光效应与超声光栅》实验数据处理参考模板

## 1. 声场光栅演示及水中声速测量

组次	$f$ (kHz)	$S_1$ (mm)	$S_2$ (mm)	$d$ (mm)	$\Lambda$ (mm)	$v$ (m/s)
1						
2						
3						

 $\bar{v} =$  \_\_\_\_\_

开始水温:  $t_1 =$  \_\_\_\_\_, 结束水温:  $t_2 =$  \_\_\_\_\_, 平均水温:  $t =$  \_\_\_\_\_,

声波在水中传播速度的理论值:  $v =$  \_\_\_\_\_

相对误差:

## 2. 超声光栅拉曼-奈斯衍射及水中声速测量

 $f =$  \_\_\_\_\_ (kHz)

$K$	$T$ (mm)	$\Lambda = K\lambda \frac{S_2}{T}$ (mm)	$v = \Lambda f$ (m/s)
+3			
+2			
+1			
-1			
-2			
-3			

 $\bar{v} =$  \_\_\_\_\_

开始水温:  $t_1 =$  \_\_\_\_\_, 结束水温:  $t_2 =$  \_\_\_\_\_, 平均水温:  $t =$  \_\_\_\_\_,

声波在水中传播速度的理论值:  $v =$  \_\_\_\_\_

相对误差: