

3.6 声光效应

当超声波通过介质时会造成介质的局部压缩和伸长而产生弹性应变，使介质出现疏密相间的现象，相当于相位光栅，当光通过时就会发生衍射现象，这种现象称之为声光效应。由于激光技术和超声技术的发展，声光效应得到了广泛的应用，利用声光效应可制成声光器件，如声光调制器、声光偏转器、谐波滤光器等；声光效应还可用来控制激光束的频率、方向和强度，在激光技术、光信号处理和集成光通讯技术等方面也有着重要的应用。

[实验目的]

1. 了解声光效应的基本原理。
2. 在布喇格型衍射下观察声光偏转现象和声光调制现象。
3. 利用声光效应测量超声波在介质中的传播速度。

[实验原理]

当超声波在介质中传播时，将引起介质的弹性应变作时间和空间上的周期性的变化，并且导致介质的折射率也发生相应变化。当光束通过有超声波的介质后就会产生衍射现象，这就是声光效应。有超声波传播的介质如同一个相位光栅。

声光效应有正常声光效应和反常声光效应之分。在各项同性介质中，声—光相互作用不导致入射光偏振状态的变化，产生正常声光效应。在各项异性介质中，声—光相互作用可能导致入射光偏振状态的变化，产生反常声光效应。反常声光效应是制造高性能声光偏转器和可调滤波器的基础。正常声光效应可用喇曼—纳斯的光栅假设作出解释，而反常声光效应不能用光栅假设作出说明。在非线性光学中，利用参量相互作用理论，可建立起声—光相互作用的统一理论，并且运用动量匹配和失配等概念对正常和反常声光效应都可作出解释。本实验只涉及到各项同性介质中的正常声光效应。

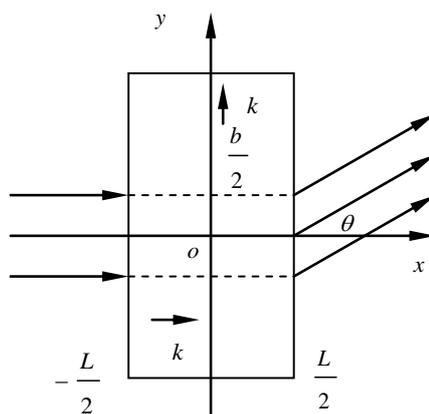


图 3.6.1 声光衍射

设声光介质中的超声行波是沿 y 方向传播的平面纵波，其角频率为 ω_s ，波长为 λ_s ，波矢为 k_s 。入射光为沿 x 方向传播的平面波，其角频率为 ω ，在介质中的波长为 λ ，波矢为 k 。介质内的弹性应变也以行波形式随声波一起传播。由于光速大约是声速的 10^5 倍，在光波通过的时间内介质在空间上的周期变化可看成是固定的。

由于应变而引起的介质的折射率的变化由下式决定

$$\Delta\left(\frac{1}{n^2}\right) = PS \tag{1}$$

式中， n 为介质折射率， S 为应变， P 为光弹系数。通常， P 和 S 为二阶张量。当声波在

各向同性介质中传播时， P 和 S 可作为标量处理，如前所述，应变也以行波形式传播，所以可写成

$$S = S_0 \sin(w_s t - k_s y) \quad (2)$$

当应变较小时，折射率作为 y 和 t 的函数可写作

$$n(y, t) = n_0 + \Delta n \sin(w_s t - k_s y) \quad (3)$$

式中， n_0 为无超声波时的介质的折射率， Δn 为声波折射率变化的幅值，由 (1) 式可求出

$$\Delta n = -\frac{1}{2} n^3 P S_0$$

设光束垂直入射 ($k \perp k_s$) 并通过厚度为 L 的介质，则前后两点的相位差为

$$\begin{aligned} \Delta\Phi &= k_0 n(y, t) L \\ &= k_0 n_0 L + k_0 \Delta n L \sin(w_s t - k_s y) \\ &= \Delta\Phi_0 + \delta\Phi \sin(w_s t - k_s y) \end{aligned} \quad (4)$$

式中， k_0 为入射光在真空中的波矢的大小，右边第一项 $\Delta\Phi_0$ 为不存在超声波时光波在介质前后两点的相位差，第二项为超声波引起的附加相位差（相位调制）， $\delta\Phi = k_0 \Delta n L$ 。可见，当平面光波入射在介质的前界面上时，超声波使出射光波的波振面变为周期变化的皱折波面，从而改变出射光的传播特性，使光产生衍射。

设入射面上 $x = -\frac{L}{2}$ 的光振动为 $E_i = A e^{it}$ ， A 为一常数，也可以是复数。考虑到在出射面 $x = \frac{L}{2}$ 上各点相位的改变和调制，在 xy 平面内离出射面很远一点的衍射光叠加结果为

$$E \propto A \int_{-\frac{b}{2}}^{\frac{b}{2}} e^{i[(w t - k_0 n(y, t) - k_0 y \sin \theta)]} dy$$

写成等式时，

$$E = C e^{i w t} \int_{-\frac{b}{2}}^{\frac{b}{2}} e^{i \delta\Phi \sin(k_s y - w_s t)} e^{-i k_0 y \sin \theta} dy \quad (5)$$

式中， b 为光束宽度， θ 为衍射角， C 为与 A 有关的常数，为了简单可取为实数。利用一与贝塞耳函数有关的恒等式

$$e^{i a \sin \theta} = \sum_{m=-\infty}^{\infty} J_m(a) e^{i m \theta}$$

式中 $J_m(a)$ 为（第一类） m 阶贝塞耳函数，将 (5) 式展开并积分得

$$E = C b \sum_{m=-\infty}^{\infty} J_m(\delta\Phi) e^{i(w-m w_s)t} \frac{\sin[b(m k_s - k_0 \sin \theta)/2]}{b(m k_s - k_0 \sin \theta)/2} \quad (6)$$

上式中与第 m 级衍射有关的项为

$$E_m = E_0 e^{i(w-m w_s)t} \quad (7)$$

$$E_0 = C b J_m(\delta\Phi) \frac{\sin[b(m k_s - k_0 \sin \theta)/2]}{b(m k_s - k_0 \sin \theta)/2} \quad (8)$$

因为函数 $\sin x / x$ 在 $x = 0$ 取极大值，因此有衍射极大的方位角 θ_m 由下式决定：

$$\sin \theta_m = m \frac{k_s}{k_0} = m \frac{\lambda_0}{\lambda_s} \quad (9)$$

式中， λ_0 为真空中光的波长， λ_s 为介质中超声波的波长。与一般的光栅方程相比可知，超声波引起的有应变的介质相当于一光栅常数为超声波长的光栅。由(7)式可知，第 m 级衍射光的频率 w_m 为

$$w_m = w - m w_s \quad (10)$$

可见，衍射光仍然是单色光，但发生了频移。由于 $w \gg w_s$ ，这种频移是很小的。

第 m 级衍射极大的强度 I_m 可用(7)式模数平方表示：

$$\begin{aligned} I_m &= E_0 E_0^* = C^2 b^2 J_m^2(\delta\Phi) \\ &= I_0 J_m^2(\delta\Phi) \end{aligned} \quad (11)$$

式中， E_0^* 为 E_0 的共轭复数， $I_0 = C^2 b^2$

第 m 级衍射极大的衍射效率 η_m 定义为第 m 级衍射光的强度与入射光的强度之比。由(11)式可知， η_m 正比于 $J_m^2(\delta\Phi)$ 。当 m 为整数时， $J_{-m}(a) = (-1)^m J_m(a)$ 。由(9)式和(11)式表明，各级衍射光相对于零级对称分布。

当光束斜入射时，如果声光作用的距离满足 $L < \lambda_s^2 / 2\lambda$ ，则各级衍射极大的方位角 θ_m 由下式决定

$$\sin \theta_m = \sin i + m \frac{\lambda_0}{\lambda_s} \quad (12)$$

式中 i 为入射光波矢 k 与超声波波面的夹角。上述的超声衍射称为喇曼-纳斯衍射，有超声波存在的介质起一平面相位光栅的作用。

当声光作用的距离满足 $L > 2\lambda_s^2 / \lambda$ ，而且光束相对于超声波波面以某一角度斜入射时，在理想情况下除了0级之外，只出现1级或-1级衍射。如图2所示。这种衍射与晶体对 X 光的布喇格衍射很类似，故称为布喇格衍射。能产生这种衍射的光束入射角称为布喇格角。此时有超声波存在的介质起体积光栅的作用。可以证明，布喇格角满足

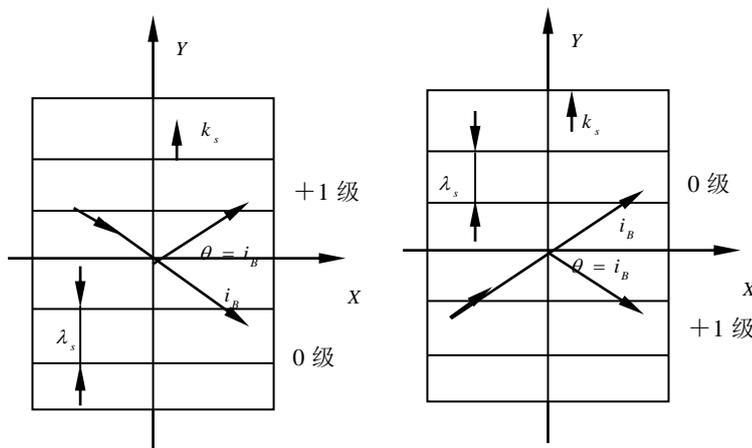


图 3.6.2 布拉格衍射

$$\sin i_B = \frac{\lambda}{2\lambda_s} \quad (13)$$

式中(13)称为布喇格条件。因为布喇角一般都很小，故衍射光相对于入射光的偏转角

$$\Phi = 2i_B \approx \frac{\lambda}{\lambda_s} = \frac{\lambda_0}{nv_s} f_s \quad (14)$$

式中， v_s 为超声波的波速， f_s 为超声波的频率，其它量的意义同前。在布喇格衍射条件下，一级衍射光的效率为

$$\eta = \sin^2 \left[\frac{\pi}{\lambda_0} \sqrt{\frac{MLP_s}{2H}} \right] \quad (15)$$

式中， P_s 为超声波功率， L 和 H 为超声换能器的长和宽， M_2 为反映声光介质本身性质的一常数， $M_2 = n^6 p^2 / \rho v_s^6$ ， ρ 为介质密度， p 为光弹系数。在布喇格衍射下，衍射光的效率也由 (10) 式决定。理论上布喇格衍射的衍射效率可达 100%，喇曼-纳斯衍射中一级衍射光的最大衍射效率仅为 34%，所以使用的声光器件一般都采用布喇格衍射。

由 (14) 式和 (15) 式可看出，通过改变超声波的频率和功率，可分别实现对激光束方向的控制和强度的调制，这是声光偏转器和声光调制器的基础。从 (10) 式可知，超声光栅衍射会产生频移，因此利用声光效应还可以制成频移器件。超声频移器在计量方面有重要应用，如用于激光多普勒测速仪。

[实验仪器]

声光器件，功率信号源，CCD 光强分布测量仪，半导体激光源，光具座，频率计，示波器。

1. 声光器件

声光器件由声光介质、压电换能器和吸声材料组成如图 3.6.3 所示。本实验采用的声光器件中的声光介质为钼酸铅，吸声材料的作用是吸收通过介质传播到端面的超声波以建立超声行波。将介质的端面磨成斜面或成牛角状，也可达到吸声的作用。压电换能器又称超声发生器，由铌酸锂晶体或其他压电材料制成。它的作用是将电功率转换成声功率，并在声光介质中建立起超声场。声光器件有一个衍射效率最大的工作频率，此频率称为声光器件的中心频率，记为 f_c 。对于其他频率的超声波，其衍射效率将降低。规定衍射效率（或衍射光的相对光强）下降 3db(即衍射效率降到最大值的 $\frac{1}{\sqrt{2}}$) 时两频率间的间隔为声光器件的带宽。

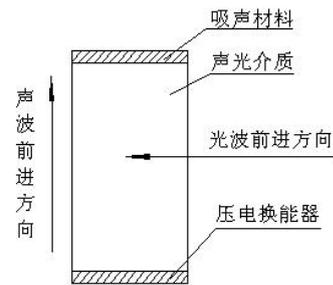


图 3.6.3 声光器件的结构

2. 高频功率信号源

SO2000 功率信号源专为声光效应实验配套，输出频率范围为 80—120MHz。最大输出功率为 1W。面板上的毫安表读数作功率指示用，读数 $\times 10$ 等于毫瓦数。面板上的插孔及旋钮的含义如下：

等幅/调幅：做基本的声光衍射实验时，要打在“等幅”位置，否则信号源无输出。

声光：输出信号插座。用于连接声光器件，将功率信号源的电信号传入声光器件，经压电换能器转换为声波后注入声光介质。

测频：输出信号插座。接频率计，用于测量功率信号源输出信号的频率。

频率旋钮：用于改变功率信号源的输出信号的频率，可调范围 80—120MHz。逆时针到底是 80MHz，顺时针到底是 120MHz。

功率旋钮：用于调节功率信号源的输出频率，逆时针减少，顺时针变大。使用时，为保证声光器件的安全，请不要长时间处于功率最大位置。

3. LM601 CCD 光强分布测量仪

LM601 光强分布测量仪采用线阵 CCD 器件，它可以在同一时刻显示、测量各级衍射光的相对光强分布，不受光源强度跳变、漂移的影响。在衍射角的测量上也有很高的精度，除在示波器上测量外，也可以用计算机来采集处理实验数据。

CCD 器件是一种可以电扫描的光电二极管阵列，有面阵（二维）和线阵（一维）之分。LM601 CCD 光强仪所用的是线阵 CCD 器件，参数见下表。LM601 CCD 光强仪机壳尺寸为 150mm × 100mm × 50mm，CCD 器件的光敏面至光强仪前面板距离为 4.5mm。

光敏元数	光敏元尺寸	光敏元中心距	光敏元线阵有效长	光谱响应范围	光谱响应峰值
2592 个	11 × 11 μm	11 μm	28.67 mm	0.35-0.9 μm	0.56 μm

4. 半导体激光源

半导体激光器的输出光强稳定，功率可调，寿命长。在后面板上有一只调节激光强度的电位器，在盒顶和盒侧各有一只 X—Y 方向微调的手轮用以调节激光束的方向。性能参数见激光器外壳上的铭牌。

5. 频率计

HC—F1000L 多功能等精度频率计面板图如图 3.6.4 所示：

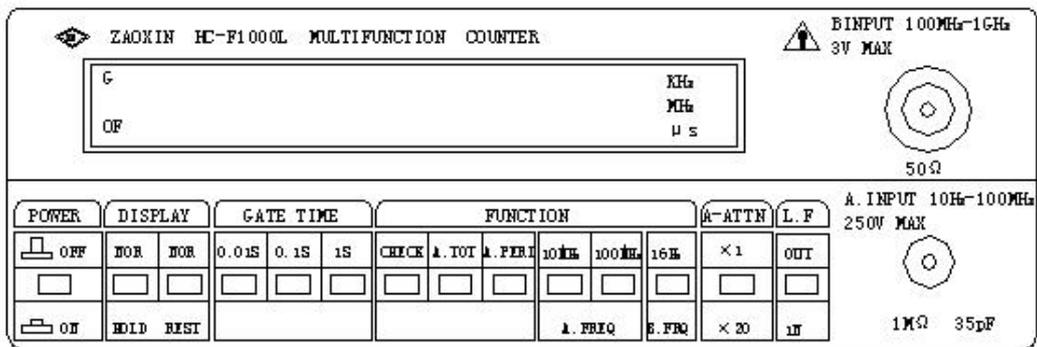


图 3.6.4 HC—F1000L 频率计面板图

- 1) 电源开关：按下按钮打开，显示器将显示两秒钟本机型号。例：F-1000-L 再按一下则关闭。
- 2) 暂停：暂停开关按下，中止测量，并保持中止前数据。
- 3) 复位：被按下时，立即复位计数器，可开始新一轮测试。
- 4) 闸门周期：用于频率、周期测量时，选择不同的分辨率及计数器计数器的周期。
- 5) 自校：主要检查整个计数器以及显示功能是否正常。按下此键，八位显示器同时 0-9 字符反复显示。
- 6) A.TOT：累计测量。（通道 A 输入）
- 7) A.PERI：周期测量。（通道 A 输入）
- 8) A.FREQ：10Mz：10Hz – 10MHz。（通道 A 输入）
- 9) A.TREQ：100Mz：10MHz – 100MHz。（通道 A 输入）
- 11) ATT：输入信号衰减开关。当按下时，输入灵敏度被降低 20 倍。（仅限于 A 通道）

12) A.INPUT: A 通道输入端。当输入信号幅度大于 300mV 时, 应按下衰减开关 ATT 降低输入信号, 能提高测量值的精确度。

13) B. INPUT: B 通道输入端。

14) 闸门指示: 指示闸门的开关状态, 门关时显示灯亮。

15) 溢出指示: 显示超出 8 位灯亮。

16) KHZ: 显示器所显示的频率单位。

17) MHZ: 显示器所显示的频率单位。

18) μs : 显示器所显示的周期单位。

[实验操作]

1. 按图 3.6.5 所示安装好仪器;

1) 光强分布仪和示波器的连接; 用一根同轴电缆线连接光强分布仪的“信号”和示波器的测量输入通道, 另一根线连接光强分布仪的“同步”和示波器的外触发同步通道。

2) 功率信号源和声光器件的连接; 将信号线一头连接声光器件, 另一头连接功率信号源的“声光”插座, 并将功率信号源打在“等幅”上。

3) 功率信号源和频率计的连接; 连接功率信号源的“测频”插座和频率计 A 输入通道插座。

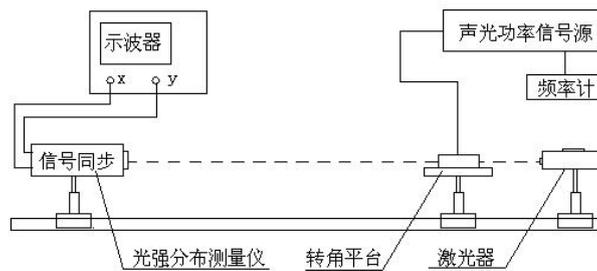


图 3.6.5 声光效应实验安装图

2. 开启激光器、光强仪、示波器的电源, 仔细调节光路, 使激光器射出的光束准确地由声光器件外塑料盒的小孔射入、穿过介质、由另一端的小孔射出, 照射到 CCD 采集窗口上, 这时衍射尚未产生 (声光器件尽量靠近激光器)。

3. 用示波器测量时, 将电压档置 0.1—1V/格档, 扫描频率一般置 2ms/格档; 极性为“+”。适当调节“触发电平”, 在示波器上可以看到如图 3.6.6 所示的单峰波形 (声光器件上无超声波时的光强信号波形)。

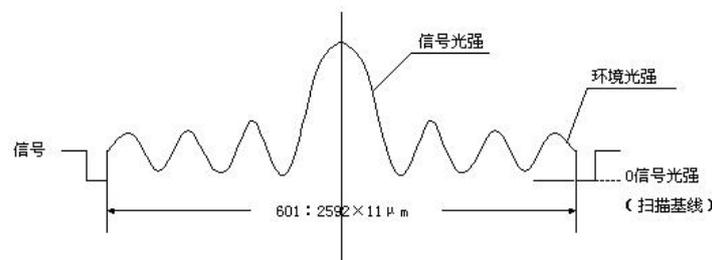


图 3.6.6 LM601 CCD 光强仪波形图

4. 打开功率信号源和频率计电源进行适当调节。

5. 反复调节激光束、声光器件、光强分布仪等之间的几何关系与激光器的功率, 便可获得布喇格衍射, 从示波器中便可观察到如图 3.6.7 所示的图形。



图 3.6.7 布喇格衍射现象

6. 在布喇格衍射条件下，将功率信号源“功率旋钮”置于中间值，调节“频率旋钮”可观察到 0 级光与 1 级光之间的相对位置会发生变化（衍射角随频率的变化）。这就是声光偏转现象。

7. 在布喇格衍射条件下，固定“频率旋钮”，调节“功率旋钮”可观察到 0 级光与 1 级光的强度会随之而变，这就是声光调制现象。

8. 进行定量测量，首先定标示波器：

用示波器进行测量时，先要解决“定标”的问题，即示波器上 1 小格等于 CCD 器件位置 X 方向上的多少距离。方法是调节示波器的“水平位移”旋钮及“扫描微调”旋钮，使信号波形一帧正好对应于示波器上的某一区间刻度数。以图 3.6.7 为例，波形一帧正好对应于示波器上的 8 大格，则每大格对应实际空间距离为 $2592 \text{ 个像元} \div 8 \text{ 格} \times 11 \mu\text{m} = 3564 \mu\text{m} = 3.564 \text{ mm}$ ，每小格对应实际空间距离为 $3.564 \text{ mm} \div 5 = 0.7128 \text{ mm}$ ，即 0 级光与 1 级光的偏转距离为： $0.7128 \text{ mm} \times 12.5 \text{ 小格} = 8.91 \text{ mm}$

9. 在布喇格衍射下，改变超声波频率的大小，从示波器中读出 0 级光和 1 级光在水平方向间隔的小格数，从频率计中读出频率记录于表格中，并进行多次测量。

10. 通过测量数据进行有关计算和误差分析。

[思考题]

1. 用示波器测量时如何进行“定标”？
2. 为什么通过改变超声波的频率和功率，可分别实现对激光束方向的控制和强度的调制？
3. 本实验用什么方法将电信号转换为超声波信号？
4. 为什么在光波通过的时间内介质在空间上的周期变化可看成是固定的？
5. 为什么声光器件一般都采用布喇格衍射？