



长安大学
Chang'an University

长安大学直属国家教育部，是国家"211工程"重点建设大学和"985工程"优势学科创新平台建设高校

学校概况

机构设置

师资队伍

教育教学

科学研究

招生就业

公共服务

数字图书馆

校友总会



声光效应

主讲教师：张翔宇

大学物理实验在线开放课程建设项目

一、实验背景

早在本世纪30年代就开始了声光衍射的实验研究。60年代激光器的问世为声光现象的研究提供了理想的光源，促进了声光效应理论和应用研究的迅速发展。声光效应为控制激光束的频率、方向和强度提供了一个有效的手段。

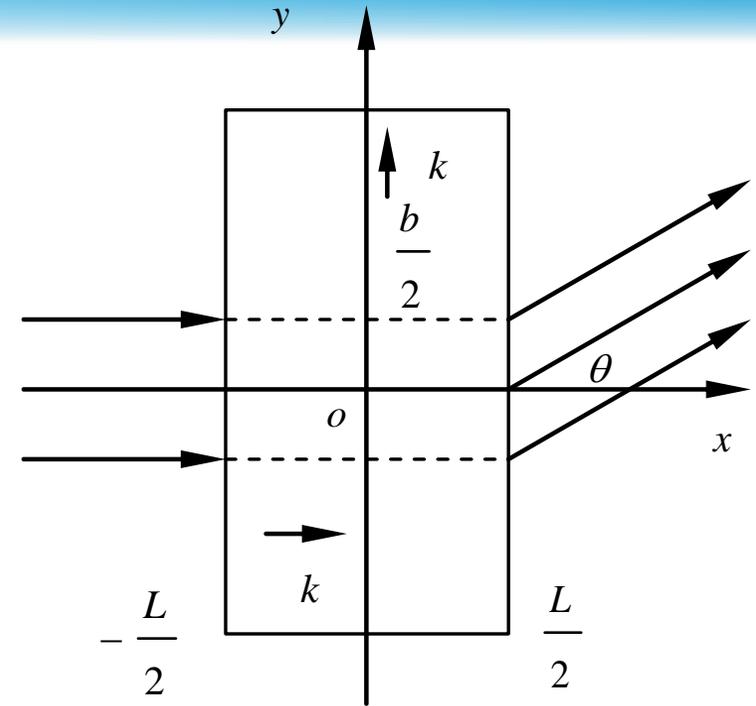
利用声光效应制成的声光器件，如声光调制器、声光偏转器和可调谐滤光器等，在激光技术、光信号处理和集成光通讯技术等方面有着重要的应用。

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。

二、基本原理

物理模型:

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 \mathbf{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 \mathbf{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。



二、基本原理

由于应变而引起的介质的折射率的变化由下式决定

$$\Delta\left(\frac{1}{n}\right) = PS \quad (1)$$

式中， n 为介质折射率， S 为应变， P 为光弹系数(介质在足够大的外力作用下，其光学性质发生改变（即折射率发生变化）的这一现象，叫做弹光效应)。

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

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

当应变较小时，折射率作为 y 和 t 的函数可写作

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

二、基本原理

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

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

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

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

$$\text{写成等式时, } E = C e^{i\omega t} \int_{-\frac{b}{2}}^{\frac{b}{2}} e^{i\delta\Phi \sin(k_s y - \omega_s t)} e^{-ik_0 y \sin \theta} dy \quad (5)$$

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

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

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

上式中与第 m 级衍射有关的项为 $E_m = E_0 e^{i(\omega - m\omega_s)t}$ (7)

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

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波长的光栅。由(7)式可知，第 m 级衍射光的频率 ω_m 为

$$\omega_m = \omega - m\omega_s \quad (10)$$

可见，衍射光仍然是单色光，但发生了频移。由于 $\omega \gg \omega_s$ ，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

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

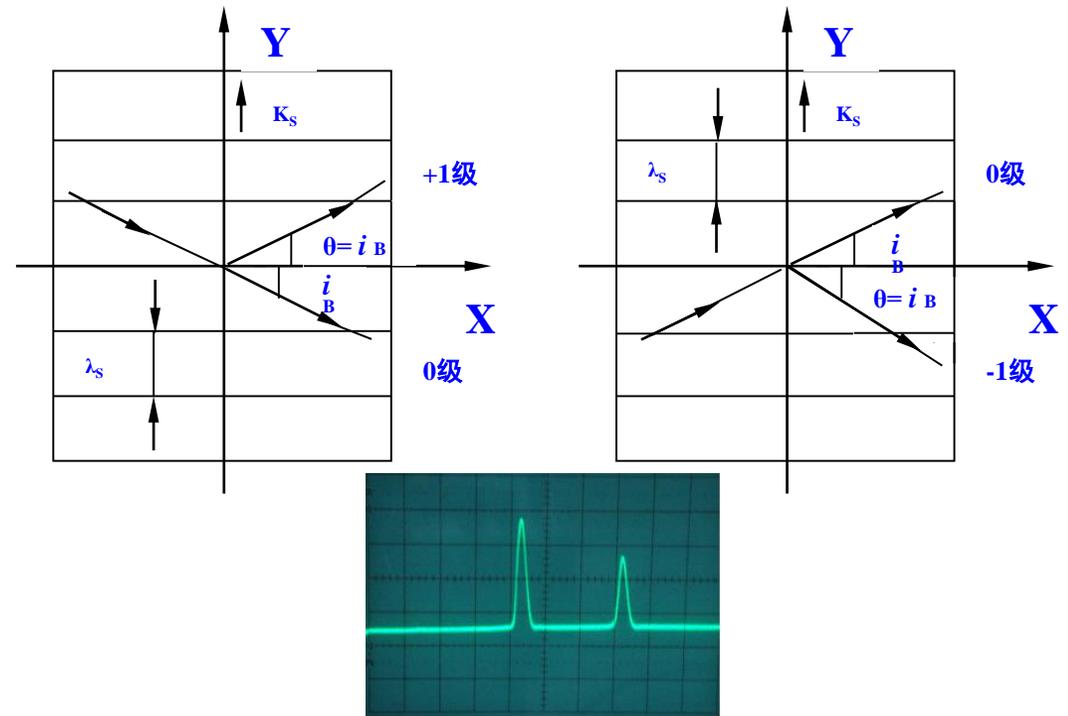
式中 i 为入射光波矢 k 与超声波波面的夹角。上述的超声衍射称为喇曼-纳斯衍射, 有超声波存在的介质起一平面相位光栅的作用。

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

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

式中 (13) 称为布喇格条件。因为布喇格角一般都很小，故衍射光相对于入射光的偏转角 $\Phi = 2i_B \approx \frac{\lambda}{\lambda_s} = \frac{\lambda_0}{nv_s} f_s$ (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

$$\eta = \sin^2 \left[\frac{\pi}{\lambda_0} \sqrt{\frac{M_2 L P_s}{2H}} \right] \quad (15)$$

式中， P_s 为超声波功率， L 和 H 为超声换能器的长和宽， M 为反映声光介质本身性质的一常数， $M_2 = n^6 p^2 / \rho v_s^{\delta}$ ， 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。

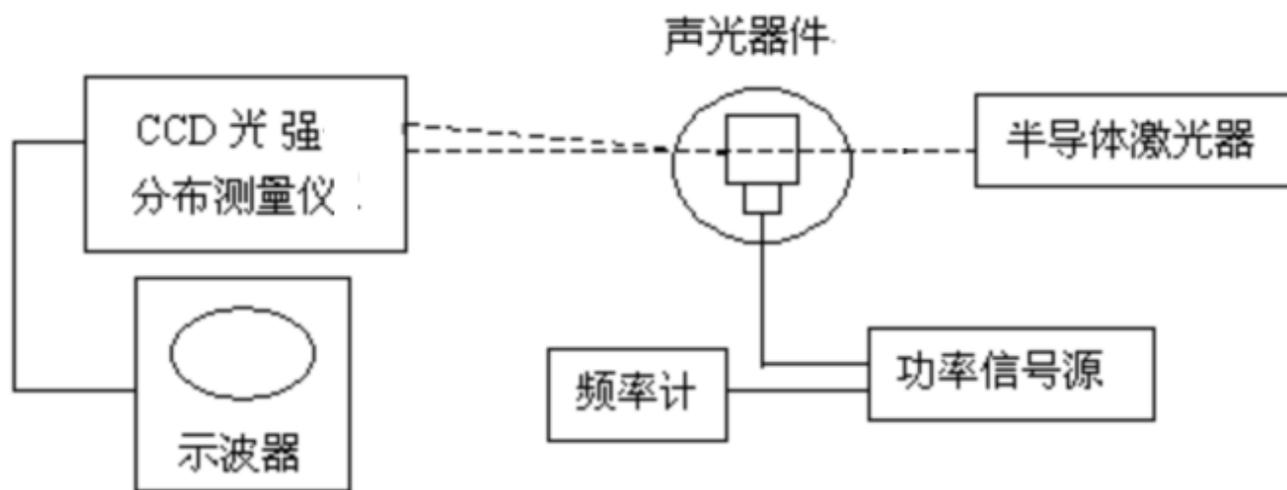
由(14)式和(15)式可看出，通过改变超声波的频率和功率，可分别实现对激光束方向的控制和强度的调制，这是声光偏转器和声光调制器的基础。从(10)式可知，超声光栅衍射会产生频移，因此利用声光效应还可以制成频移器件。超声频移器在计量方面有重要应用，如用于激光多普勒测速仪。

三、实验内容

(1) 实验测试内容

- (一) 在布喇格衍射下，测量偏转角，计算超声波声速。
- (二) 在布喇格衍射下，固定超声波功率，测量衍射光相对于0级衍射光的相对强度与超声波的频率，确定声光器件的中心频率。
- (三) 在布喇格衍射下，将功率信号源的超声波频率固定在声光器件的中心频率上，记录衍射0级光光强 (I_0) 和1级光光强度 (I_1) 以及超声波功率 (P_s)。
- (四) 测定布喇格衍射下的最大衍射效率。

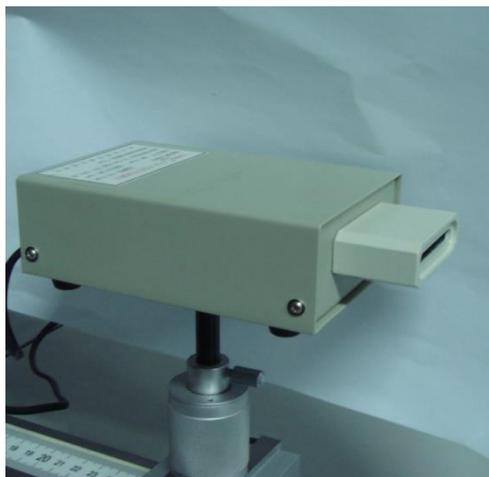
(2) 各实验测试内容的测试步骤及应注意的问题



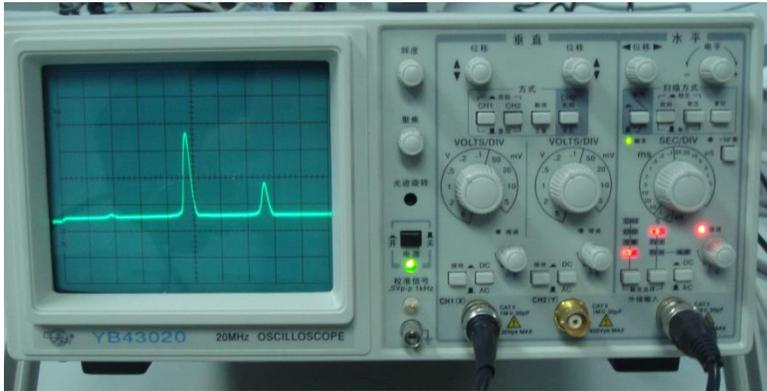
声光效应实验仪器装置俯视图

注意：不能直接用眼睛去看激光束，以免造成永久性的损伤。

(2) 各实验测试内容的测试步骤及应注意的问题



(2) 各实验测试内容的测试步骤及应注意的问题



定标：即示波器X方向上的1格等于CCD器件上多少象元，或者示波器上1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“时基”档及“微调”，使信号波形一帧正好对应于示波器上的某个刻度数。本实验测量光强采用的是一维阵列CCD，共2592个像元，每个像元的长度为 $11\mu\text{m}$ 。如果波形一帧正好对应于示波器上的8.0大格，则每小格对应实际空间距离为 $2592\text{个像元} \div (8.0\text{大格} \times 5) \times 11\mu\text{m} = 0.7128\text{mm}$ 。

(3) 数据记录、处理的相关问题

1) 声速和中心频率的测量:

$L/\text{mm} =$ _____

$i_s = 80\text{mA}$

$\lambda_0 =$ 650 nm

次数	0级光与1级光的偏转小格数	偏转距离 d/mm	偏转角 $= d/L$	f_s/MHz	I_0 (小格数)	I_1 (小格数)
1				80		
2				90		
3				100		
4				110		
5				120		

注意：声光介质的光出射面到CCD线阵光敏面的距离，应为两者底座的同侧距离减60.0mm。

(3) 数据记录、处理的相关问题

2) 衍射光强度与超声波功率的关系

超声波频率固定在声光器件的中心频率上

次数	$(I) / \text{mA}$	I_0 (小格数)	I_1 (小格数)
1	50		
2	60		
3	70		
4	80		
5	90		
6	100		

3) 测定布喇格衍射下的最大衍射效率

(3) 数据记录、处理的相关问题

- 1) 在布喇格衍射下，测量声光偏转量，计算超声波声速，和公认值比较计算相对误差。
- 2) 在布喇格衍射下，固定超声波功率，确定声光器件的中心频率。
- 3) 阐述在布喇格衍射下，固定超声波频率时衍射光强度如何随超声波功率变化。
- 4) 测定布喇格衍射下的最大衍射效率。

四、拓展实验

- a) 液体中的声光效应（拉曼-奈斯衍射）：
- b) 各级衍射光强的分布趋势与数值计算分布规律比较
- c) 声波功率与高级次的衍射光强度的关系
- d) 温度对声光衍射效率、相对光强比的影响
- e) 溶液浓度对声光衍射效率、相对光强比的影响

四、思考题与实验报告

思考题：

- a) 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？
- b) 本实验用什么方法将电信号转换为超声波信号？
- c) 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？
- d) 为什么声光器件一般都采用布喇格衍射？

谢谢！