
晶体声光调制实验

实验讲义

晶体声光调制实验

一、引言

声光效应是指光通过某一受到超声波扰动的介质时发生衍射的现象，这种现象是光波与介质中声波相互作用的结果。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。

二、实验目的

- 1、了解声光效应的原理。
- 2、了解布喇格衍射的实验条件和特点。
- 3、完成声光通信实验光路的安装及调试。
- 4、测量衍射光的强度
- 5、计算超声信号形成的光栅常数

三、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。

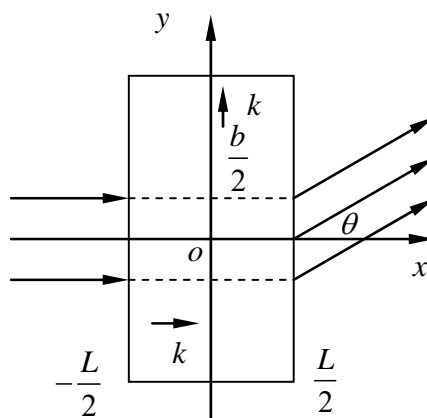


图 1 声光衍射

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。

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。

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。

由于应变而引起的介质的折射率的变化由下式决定

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

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。当声波在各项同性介质中传播时， 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

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

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 ($\mathbf{k} \perp \mathbf{k}_s$) 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 $E_i = Ae^{it}$ ， 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

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

写成等式时，

$$E = Ce^{iwt} \int_{-\frac{b}{2}}^{\frac{b}{2}} e^{i\delta\Phi \sin(k_s y - w_s t)} e^{-ik_0 y \sin \theta} dy \quad (5)$$

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

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

上式中与第 m 级衍射有关的项为

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

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

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长的光栅。由（7）式可知，第 m 级衍射光的频率 w_m 为

$$w_m = w - mw_s \quad (10)$$

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

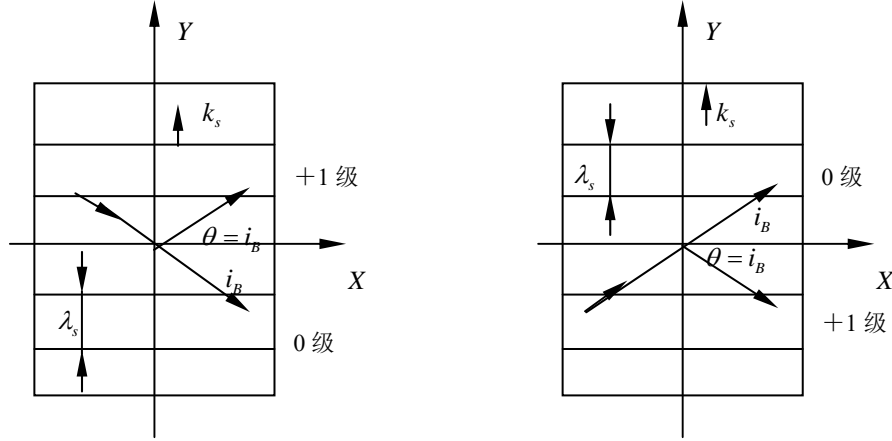


图 2 布拉格衍射

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

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

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

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

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

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

以上讨论的是超声行波对光波的衍射。实际上，超声驻波对光波的衍射也产生喇曼-纳斯衍射和布喇格衍射，而且各衍射光的方位角和超声频率的关系与超声行波的相同。不过，各级衍射光不再是简单地产生频移的单色光，而是含有多个傅立叶分量的复合光。

四、实验内容

1、声光晶体衍射角测量

1-1 声光晶体衍射角测量光路搭建

(1) 参考图 3 搭建声光晶体衍射光路。自左向右依次为**激光器**（激光波长 650nm）、**声光晶体**和**白屏**。



图 3 声光晶体衍射角测量光路

(2) 安装**激光器**，可以将白屏调整到合适高度，以白屏刻线作为参考高度，将白屏移到激光器近处和远处，分别调整激光器的高低和激光器夹持器的俯仰使激光均能打在刻线上，反复两次即可将激光调平。

(3) 安装**白屏**，将白屏移动到导轨右端，并将其固定在导轨上。

(4) 安装**声光晶体**（将声光晶体与驱动源相连，同时将 MP3 音源连接到驱动源 Vtone 上，MP3 可以不工作），适当旋转晶体角度，可以观察到透过晶体的光在布拉格衍射角下一级衍射最强。

1-2 数据记录与处理

(1) 使用白屏接收衍射光斑，读取 0 级 1 级衍射光斑的距离 a 和测量晶体到白纸屏的距离 b 计算衍射角 θ ，根据公式

$$d \sin \theta = K \lambda \quad (16)$$

其中 θ 为衍射角， d 为光栅常数， $K=1$ 为级次， λ 为波长 650nm，从而计算 650nm 波长下形成的光栅常数。

2、声光晶体通讯实验

2-1 声光晶体通信实验光路搭建

(1) 参考图 3 搭建声光晶体衍射光路。自左向右依次为**激光器**（激光波长 650nm）、**声光晶体**和**探测器**。

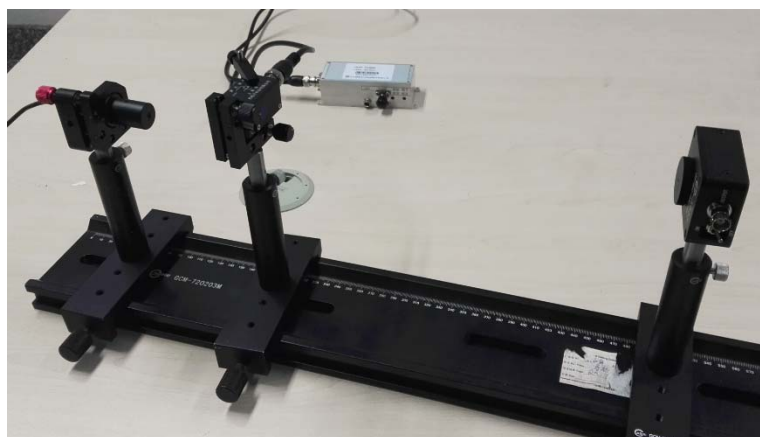


图 4 声光晶体通信光路

(2) 安装**激光器**，可以将白屏调整到合适高度，以白屏刻线作为参考高度，将白屏移到激光器近处和远处，分别调整激光器的高低和激光器夹持器的俯仰使激光均能打在刻线上，反复两次即可将激光调平。

(3) 安装**声光晶体**，（将声光晶体与驱动源相连，同时将 MP3 音源连接到驱动源 Vtone 上，MP3 可以不工作），适当旋转晶体角度，可以观察到透过晶体的光在布拉格衍射角下一级衍射最强。

(4) 安装**探测器**，调整探测器高低及左右位置，使衍射 1 级光斑入射到接收口中，并将光电探测器接口与音箱相连。

1-2 结果处理

(1) 当衍射光斑的 1 级或-1 级入射探测器接收口，打开 MP3 音源，同时调整音箱的开关，一般可以听到播放的乐曲。调整 MP3 音源的音量，可以感受音箱播放的强弱变化。

(2) 如果以上调试没有问题，但仍然没有听到乐曲，可以适当调整探测器位置，一般激光较强时探测器会出现饱和，影响接收质量。

附：实验仪器介绍

高速正弦声光调制器及驱动电源，可用在激光照排机、激光传真机、电子分色机或者其他文字、图像处理等系统中。

1、主要技术指标（测试条件输入信号为 1V）

激光波长:	650nm
工作频率:	100MHz
衍射效率:	$\geq 70\%$
正弦重复频率:	$\geq 8\text{MHz}$
静态透过率:	$\geq 90\%$

2、工作原理

本产品由声光调制器及驱动电源两部分组成。驱动电源产生 100MHz 频率的射频功率信号加入声光调制器，压电换能器将射频功率信号转变为超声信号，当激光束以布拉格角度通过时，由于声光互作用效应，激光束发生衍射（如图 1），这就是布拉格衍射效应。外加文字和图像信号以正弦（连续波）输入驱动电源的调制接口“调制”端，衍射光光强将随此信号变化，从而达到控制激光输出特性的目的，如图 2 所示。

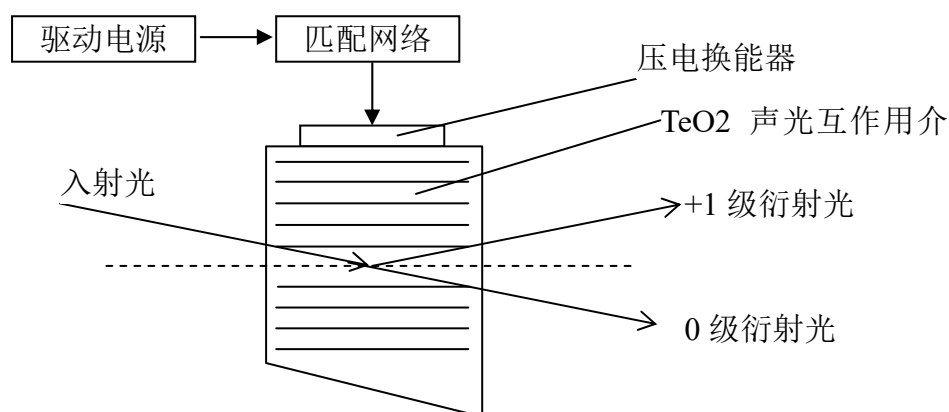


图 1 布拉格衍射原理图

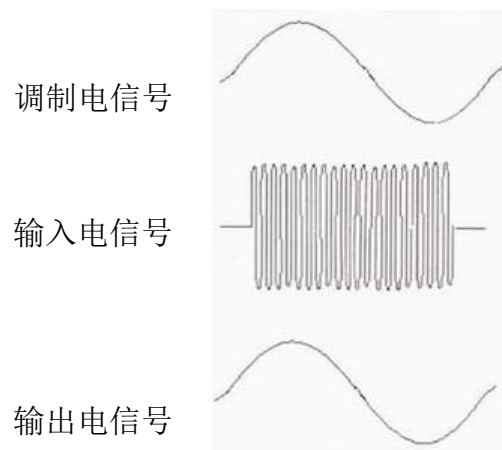


图 2 衍射光随调制信号的变化

声光调制器由声光介质（氧化碲晶体）和压电换能器（铌酸锂晶体）、阻抗匹配网络组成，声光介质两通光面镀有 650nm 的光学增透膜。整个器件由铝制外壳安装。外形尺寸和安装尺寸如图 3 示（单位：mm）。

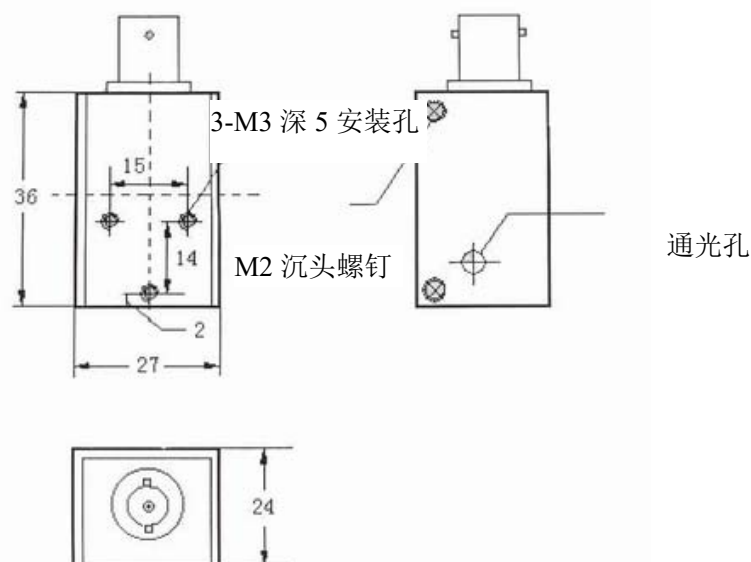


图 3 声光调制器外形尺寸

驱动电源由振荡器、转换电路、调制门电路、电压放大电路、功率放大电路组成。外输入调制信号由“调制输入”端输入，工作电压为直流+24V，“输出”端输出驱动功率，用高频电缆线与声光器件相联。外形尺寸和安装尺寸如图 4 示（单位：mm）。

3、使用和维修

3.1 使用方法

3.1.1 用高频电缆将声光器件和驱动电源“输出”端联接；

3.1.2 接上+24V 的直流工作电压。调制输入电信号幅度在 250~350mV 之间；

3.1.3 调整声光器件在光路中的位置和光的入射角度，在一级衍射光达到最好状态；

3.1.4+24V 的直流工作电压不得接反，否则驱动电源烧坏；；

3.1.5 驱动电源不得空载，即加上直流工作电压前，应先将驱动电源“输出”端与声光器件或其他 50Ω 负载相连；

3.1.6 产品应小心轻放，特别是声光器件更应注意，否则将可损坏晶体而报废；

3.1.7 声光器件的通光面不得接触，否则损坏光学增透膜。