

# 晶体电光和声光效应研究

Zric 物理学系

**摘要：**本实验研究了晶体的电光效应和声光效应。电光效应方面，利用  $\text{LiNbO}_3$  晶体的一次电光效应对偏振光进行相位调制，并分别用直流偏置和交流调制方法测量电光调制中的半波电压以及电光系数。还通过旋转  $1/4$  波片进行电光调制，分析了倍频现象的出现规律。声光效应方面，研究了  $\text{TeO}_2$  晶体中超声波与光波的相互作用机制，测量了布拉格衍射下声光器件的频率特性、功率特性及 1 级衍射效率，并研究了喇曼-奈斯衍射。实验结果验证了理论预测，为电光器件和声光器件应用提供了实验依据。

## 一、引言

晶体在外加电场作用下，其折射率随外加电场变化的现象称为电光效应。利用具有电光效应的晶体（电光晶体）制成的、通过外电场强度迅速调制偏振光相位差的光学元件，称为电光调制器<sup>[1]</sup>，可通过调制电信号来控制光信号，具有调制速度快、频率宽、线性范围大等优点，广泛应用于光通信、光信息处理、光测量等领域。

声光效应是指光通过某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超声波相互作用的结果。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，在光信号处理和集成光通讯技术等方面有着重要的应用。<sup>[2]</sup>

二者均利用了晶体对外场的快速响应改变晶体的宏观性质，如介电张量，同时由于晶体空间群的对称性，宏观性质也具有可预测的空间对称性，方便对光信号进行方向和强度调制。

## 二、实验原理

### 2.1 晶体电光效应

#### (1) 一次电光效应

当外加电场足够强时，将会对原子内部电场产生不可忽略的微扰，组成物质的原子能级和形状都将会发生畸变，这将改变物质的介电常数  $\epsilon$ ，由于折射率  $n$  和介电常数是相关的，因此外加电场  $E$  也就引起了折射率的变化。另由于外加电场远小于原子内部电场（ $\approx 10^8 \text{ V/cm}$ ），因此可以将折射率按照外电场  $E$  Taylor 展开，写为：

$$n(E) = n_0 + n_1 E + n_2 E^2 + \dots \quad (1)$$

其中  $n_0$  是无电场时的折射率， $n_1$  是线性电光系数， $n_2$  是二次电光系数。由于一次效应较二次效应显著得多，本实验主要研究一次效应，忽略二次效应。

实验使用铌酸锂 ( $\text{LiNbO}_3$ ) 晶体，为三角晶系 3m 点群，负单轴晶体，无电场时，在主轴坐标系中，其折射率椭球方程为<sup>[3]</sup>：

$$\frac{x^2}{n_o^2} + \frac{y^2}{n_o^2} + \frac{z^2}{n_e^2} = 1 \quad (2)$$

其中  $n_o$  和  $n_e$  分别为单轴晶体的 o 光和 e 光的主折射率。

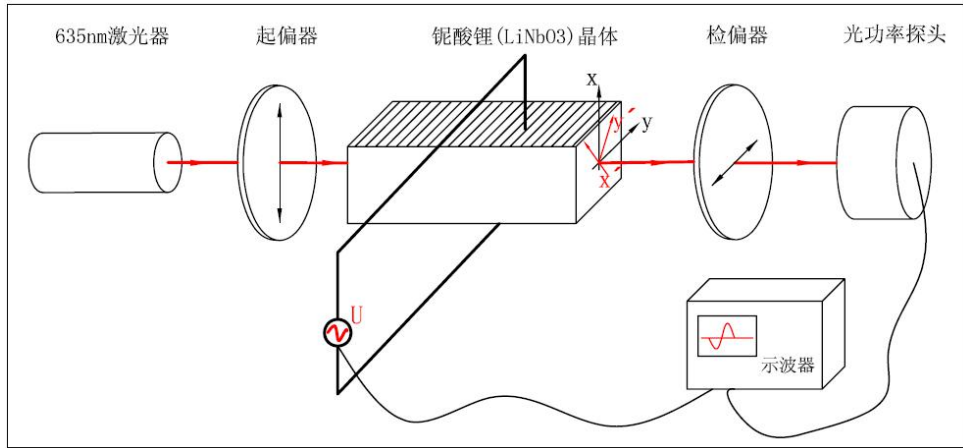


Figure 1 电光效应示意图

实验中采用横向电光调制，外加电场下， $\text{LiNbO}_3$  由单轴变为双轴晶体。入射光方向沿晶体原光轴方向 ( $z$  轴)，电场  $E$  与  $x$  轴方向平行。由于晶体一次电光效应，折射率椭球将在电场下发生旋转与变形，另外由于光束平行于  $z$  轴，因此只需要考虑  $z=0$  时候  $xOy$  平面内的折射率椭球的变化。此时新的感生折射率主轴  $x', y'$  相对于原  $x, y$  轴旋转了  $45^\circ$ ，新的主轴坐标中折射率椭球方程为：

$$\frac{x'^2}{\frac{1}{n_o^2} - \gamma_{22}E} + \frac{y'^2}{\frac{1}{n_o^2} + \gamma_{22}E} = 1 \quad (3)$$

此时新的感应主折射率可以简化为

$$n_{x'} = n_o + \frac{1}{2}n_o^3\gamma_{22}E \quad (4)$$

$$n_{y'} = n_o - \frac{1}{2}n_o^3\gamma_{22}E \quad (5)$$

式中  $\gamma_{22}$  为电光系数。当激光沿  $z$  轴入射后，会在晶体中分为沿  $x'$  和  $y'$  方向的分振动，由于二者折射率不同，这将导致光束通过晶体后产生一定的相位差  $\Phi$ 。当晶体

长为  $L$ ，厚为  $d$ ，所加电压为  $U$ ，激光波长为  $\lambda$ 。时，相位差  $\Phi$  可以写为：

$$\Phi = \frac{2\pi}{\lambda} (n_{x'} - n_{y'}) L = \frac{2\pi}{\lambda} n_0^3 \gamma_{22} \frac{L}{d} U \quad (6)$$

当相差相位为  $\pi$  时，相应的电压值称为半波电压  $U_\pi$ ，是电光调制的重要参数。

## (2) 直流偏置与正弦信号调制

在外加直流偏置条件下，通过共轴调节起偏器和检偏器的角度，使得电压  $U$  对光强  $I_A$  的调制作用最大，此时

$$I_A \propto \frac{1}{2} I_p \left( 1 - \cos \frac{\pi}{U_\pi} (U - U_0) \right) \quad (7)$$

$U_0$  为光强最小时对应电压，当  $U$  在  $U_0 + (2k+1)\frac{U_\pi}{2}$  ( $k = \pm 0, 1, 2, 3 \dots$ ) 附近时，光强  $I_A$  与电压  $U$  近似有线性关系，这也是电光调制器的通常意义上的线性工作点。

在直流偏置  $U_D$  基础上再加上一个正弦调制信号，满足  $U = U_D + U_m \sin(\omega t)$ , ( $U_m \ll U_D$ ) 此时会出现两种情况：

若  $U_D = U_0 + (2k+1)\frac{U_\pi}{2}$ ，这时输出信号和输入的调制信号频率一致，输出信号不存在失真，输出光强与调制信号有近似的线性关系，即线性调制，

$$I_A \approx \frac{1}{2} I_p \left\{ 1 + (-1)^k \frac{U_m}{U_\pi} \pi \sin \omega t \right\} \quad (k = \pm 0, 1, 2, 3 \dots) \quad (8)$$

若  $U_D = U_0 + kU_\pi$ ，此时出现倍频失真，输出频率是调制信号频率的两倍。

$$I_A \approx \frac{1}{2} I_p \left\{ 1 + \frac{1}{2} (-1)^{k+1} \left[ 1 - \left( \frac{U_m}{U_\pi} \pi \right)^2 \sin^2 \omega t \right] \right\} \quad (9)$$

## 2.2 晶体声光效应

### (1) 喇曼-奈斯衍射

当超声波频率较低，光波平行于声波面入射，声光互作用长度  $L$  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，声光介质可近似看作为相对静止的“平面位相光栅”，称为喇曼-奈斯衍射。 $m$  级衍射角  $\theta_m$  与声波波长  $\lambda_s$  和光波波长  $\lambda_0$  之间的关系为：

$$\sin \theta_m = m \frac{\lambda_0}{\lambda_s} \quad (10)$$

由于存在多级衍射光分散能量，喇曼-奈斯衍射的 1 级衍射效率较低。

### (2) 布拉格衍射

当超声波频率较高，声光相互作用长度  $L$  较长，满足条件  $L > 2L_0$  ( $L_0$  为声光衍射的特征长度，定义式表示为  $L_0 \approx \frac{\lambda_s^2}{\lambda_0}$ ， $\lambda_0$  为真空中光的波长，本实验  $\lambda_0 = 650\text{nm}$ )，而且光束相对于超声波波面以某一角度斜入射时，光波在介质中要穿过多个声波面，故介质具有体光栅的性质。当入射光与声波波面间满足一定条件时，介质内各级衍射光会相互干涉，各高级次衍射光将互相抵消。在理想情况下除了 0 级之外，只出现 1 级或者 -1 级衍射，这种衍射称为布拉格衍射。能产生这种衍射的光束入射角称为布拉格角。

布拉格角  $i_B$  满足：

$$\sin i_B = \frac{\lambda_0}{2\lambda_s} \quad (11)$$

衍射光相对于入射光的在晶体外的偏转角  $\phi$  为 ( $v_s$  为超声波波速， $f_s$  为超声波频率)：

$$\phi = 2i_B \approx \frac{\lambda_0}{v_s} f_s \quad (12)$$

偏转角  $\phi$  随超声频率改变，改变驱动电信号的频率，就可以控制衍射光的偏转方向，实现声光偏转。偏转角的几何表示为：

$$\phi = (X \frac{y}{Y}) / D \quad (13)$$

$y, Y, D$  在实验中均不变，其中线阵 CCD 有效像元的实际总长度  $y=28.672\text{ mm}$ ，线阵 CCD 总共占据的水平格数  $Y=5.6\text{ div}$ ，CCD 受光面到晶体中心的距离  $D=615\text{ mm}$ 。

理论计算得到 1 级衍射光衍射效率  $\eta$  为：

$$\eta = \sin^2 \left( \frac{\pi}{\lambda_0} \sqrt{\frac{M_2 L P_s}{2H}} \right) \quad (14)$$

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常数，称为声光优值，定义为  $M_2 = \frac{n^6 P^2}{\rho v_s^3}$ ， $\rho$  为介质密度， $P$  为光弹系数。通过控制加在换能器上驱动电信号的功率，达到控制衍射光强度的目的，实现声光调制。

当超声波功率超过一定值，使得  $\frac{\pi}{\lambda_0} \sqrt{\frac{M_2 L P_s}{2H}} > \frac{\pi}{2}$  时，效率  $\eta$  会随功率增大而减小，引起信号失真。

### (3) 声光器件带宽

在声光器件的设计中，尤其是声光偏转器的设计中，带宽是一个非常重要的问题。带宽越宽，偏转器工作的频率范围越大。声光器件中存在两种转换，每一种转换都有相应的带宽问题。首先，压电换能器把电振荡转换成超声振荡，形成超声波，能够在多大频率范围内有效地将电功率转换成超声功率，称为换能器带宽。

其次，在声光介质中通过声光互作用，超声波将引起入射光的布拉格衍射产生衍射光，在实际工作时声光器件往往是入射角保持不变，超声频率不同时会引起不同程度的失配，能够在多大频率范围内有效地完成布拉格衍射称为声光互作用带宽，或布拉格带宽。<sup>[4]</sup>

换能器带宽和布拉格带宽形成了声光器件的综合带宽。一般定义声光衍射效率从最大值下降一半时的频率宽度为声光互作用 3dB 带宽。

### 三、 实验装置及过程

#### 3.1 晶体电光效应

(1) 实验装置： 1. CDG 晶体电光效应测试仪主机 1 台；2. 双声道音箱 1 台；3. 半导体激光器 1 台；4. 偏光镜 2 个；5. LN 晶体盒 1 个；6. 波片镜 1 个；7. 光功率接收器 1 个；8. 准直屏 1 个；9. 导轨装置 1 个；10. 滑块调节装置 7 个

(2) 实验过程：1、单轴、双轴晶体的会聚光的锥光干涉图的观测；2、极值法测试直流偏置下的光输出特性，测量半波电压  $U_{\pi}$ ；3、电光晶体的交流调制与半波电压的测量；4、计算电光系数  $\gamma_{22}$ ；5、使用 1/4 波片进行电光调制；6、利用  $\text{LiNbO}_3$  晶体的电光效应，实现音频信号的光通信演示；

#### 3.2 晶体声光效应

(1) 实验装置： 1. 半导体激光器 1 台；2. 声光器件 1 台；3. 功率信号源 1 台；4. 准直屏 1 块；5. 线阵 CCD 光电转换器 1 个；6. 示波器 1 台；7. 导轨 1 个

(2) 实验过程：

声光器件频率特性测量：1、测量 0 级和 1 级衍射光偏离量  $X$  与超声频率  $f_s$  的关系；2、计算晶体中的超声波速  $v_s$ ；3、测量声光器件的带宽；

声光器件功率特性测量：1、测量声光调制曲线；2、测量喇曼-奈斯条件下的衍射角  $\phi$  和衍射效率  $\eta$ ；

### 四、 实验结果和分析

#### 4.1 晶体电光效应

(1) 直流偏置

调节起偏器和检偏器的角度使其正交，使得电压  $U$  对光强  $I_A$  的调制作用最大。使用极值法测量半波电压，从 0V 开始逐渐增加电压，测量光功率与电压的关系，如图所示：

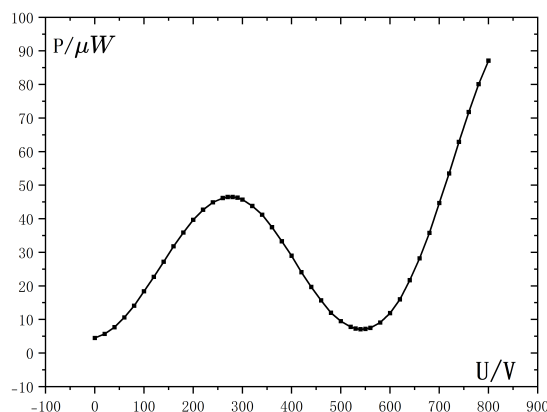


Figure 2 光功率  $P$  与电压  $U$  关系

从 Figure2 中可以看出，直流偏置电压在 0-700V 范围内，出射光功率  $P$  与  $U$  近似为一条正弦曲线，分别选取 200-600V 段曲线上  $P$  取最大值和最小值时对应横坐标，它们的差值即为半波电压  $U_\pi$ 。线性工作点  $U_L = U_0 + \frac{2k+1}{2}U_\pi$ ，此处存在 2 个线性工作点  $U_{L1} = 142.5\text{V}$ ， $U_{L2} = 407.5\text{V}$

半波电压  $U_\pi = 265\text{V}$ ，由公式 (6) 计算得到电光系数  $\gamma_{22} = 8.36 \times 10^{-12}\text{mV}^{-1}$

可以看到在  $U > 700\text{V}$  之后的曲线并不符合理论预测的周期正弦图像，而是持续增大，推测出现此反常现象的原因可能是 1、随着外加电场增大，二次电光效应不可忽略，引起相位差  $\Phi$  不再随  $U$  线性改变，可能出现相位超前的情况，使得光功率值提前增大；2、实验中入射激光不完全平行于电光器件中晶体  $z$  轴，使得沿  $x', y'$  轴方向的偏振光偏离入射方向，相干叠加后的总光强与完全平行入射情况不一致 [5]。

## (2) 交流调制

在直流偏置基础上，加上正弦调制信号  $U_m = 65\text{V}$ ，频率  $f = 1\text{kHz}$ ，从 0V 开始逐渐增大直流电压，观察示波器上信号曲线变化，当观察到正弦波形曲线周期变为原周期的 1/2，振幅也小于线性调制区振幅时即为倍频失真，记录发生倍频失真时对应电压。

第 1 次倍频失真对应直流偏置电压  $U_D = 140\text{V}$ ，第 2 次倍频失真对应直流偏置电压  $U_D = 435\text{V}$ ，两次偏置电压之差即为半波电压  $U_\pi$  半波电压  $U_\pi = 295\text{V}$ ，由公式 (6) 计算得到电光系数  $\gamma_{22} = 7.53 \times 10^{-12}\text{mV}^{-1}$ ，与直流偏置下的结果的相对误差为  $\beta = 10.1\%$

### (3) 1/4 波片调制

在晶体的交流调制中，可以在起偏器和电光器件之间插入一个 1/4 波片，控制直流偏置电压不变，通过旋转 1/4 波片的角度选择工作点，从而实现信号的线性调制，设 1/4 波片的 e 轴与晶体的 y 轴呈  $\theta$  角，根据偏振光的合成与分解，最终通过检偏器的偏振方向输出的光强为：

$$I_A = \frac{1}{2}I_P(1 + \sin 2\theta \sin \Phi - \cos^2 2\theta \cos \Phi) \quad (15)$$

第 1 次实验设置直流偏置电压  $U_D = 0V$  交流电压  $U_m = 65V$ ，旋转 1/4 波片一周，观察示波器图像，全过程出现 2 次倍频失真，第 1 次倍频失真对应  $\theta = 60.0^\circ$ ，第 2 次倍频失真对应  $\theta = 240.0^\circ$ ，相邻角度差为  $180^\circ$

第 2 次实验设置直流偏置电压  $U_D = 141 = U_0 + U_\pi V$  交流电压  $U_m = 65V$ ，旋转 1/4 波片一周，观察示波器图像，全过程出现 4 次倍频失真，相邻角度差为  $90^\circ$ ，第 1 次倍频失真对应  $\theta = 21.0^\circ$ ，第 2 次倍频失真对应  $\theta = 111.0^\circ$ ，第 3 次倍频失真对应  $\theta = 201.0^\circ$ ，第 4 次倍频失真对应  $\theta = 291.0^\circ$

解释：直流偏置为 0 时，且仅当  $\theta = 0, \pi$  时出现倍频失真，这是因为工作点不位于  $U_0$ ，光强调制函数关于  $\theta$  呈偶对称，其按照  $\frac{U_m}{U_\pi}$  泰勒展开只包含  $\sin \theta$  偶次项，因此只有 2 次倍频失真；

直流偏置  $U_D = 141 = U_0 + U_\pi$  时，根据公式 (15)，在  $\theta = 0, \frac{\pi}{2}, \pi, \frac{3\pi}{2}$  时， $I_A = \frac{1}{2}I_P(1 - \cos \Phi)$ ，再根据公式 (9) 可知此时将出现倍频失真，因此共有 4 次倍频失真。

## 4.2 晶体声光效应

### (1) 声光器件频率特性测量

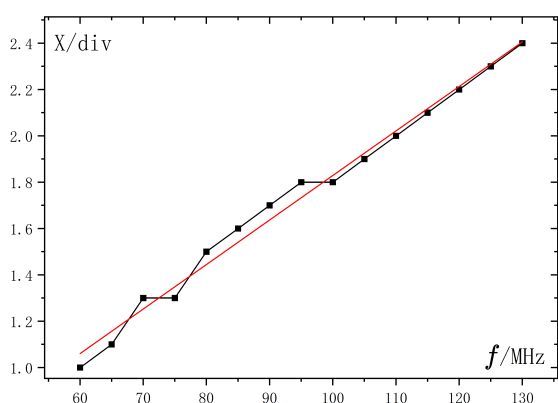


Figure 3 1 极与 0 极间距 X 与超声频率 f 关系

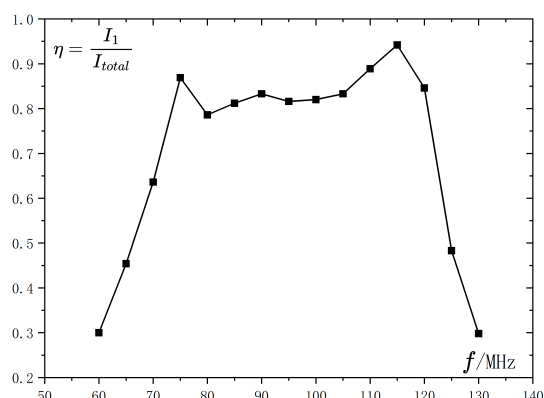


Figure 4 1 级衍射效率  $\eta$  与超声频率 f 关系

在布拉格衍射条件下测量，保持功率  $P=200\text{mW}$  不变，改变超声频率，记录不同频率下 1 级衍射光对 0 级的偏离格数  $X$  及 0 级光及 1 级光的强度（用示波器上曲线峰值对应格数表示）。

Figure3 中可以看出，1 级衍射光偏离量  $X$  随着超声频率  $f$  的增加而增加，且  $X$  与  $f$  呈线性关系，通过线性拟合得到斜率为  $k = 0.019\text{div/MHz}$ ， $R^2 = 0.9889$ ，代入公式 (12)(13) 求出超声波波速  $v_s = 4108\text{m/s}$ ，参考值  $4203\text{m/s}$ ，相对误差为  $\beta = 2.2\%$ ，结果较为准确。

Figure4 中可以根据声光衍射效率从最大值下降一半截取，得到声光互作用 3dB 带宽约为  $50\text{MHz}$

## (2) 测量声光调制曲线

超声频率调到  $100\text{MHz}$  处，调节声光器件的转角使入射角与  $100\text{MHz}$  的布拉格角匹配（细调声光器件的水平转角，使得从示波器上观察 1 级衍射强度达到最大，此时入射角等于该频率处的布拉格角）。保持频率不变，改变驱动功率，记录不同驱动功率下 1 级衍射强度和 0 级光强度（用示波器上曲线峰值对应格数表示）。

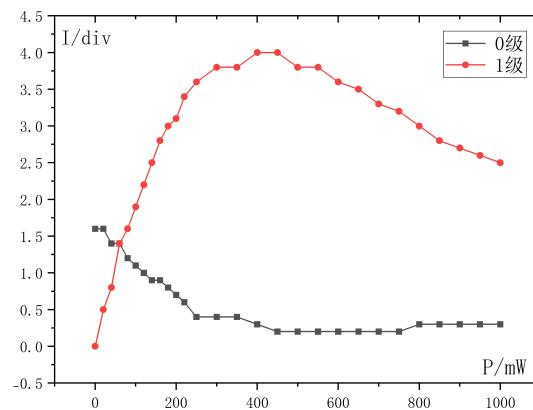


Figure 5 声光调制曲线

Figure5 中可以看出，在  $0\text{-}450\text{W}$  驱动功率范围内，驱动功率增大，1 级衍射光强度增大，0 级衍射光强度减小；当超过  $450\text{W}$  后，1 级衍射强度反而随着功率的增加而减小，0 级衍射强度几乎不变，这符合公式 (14) 的预测，计算得最大 1 级衍射效率

$$\eta_{\max} = \frac{I_1}{I_0 + I_1} = 95.2\%。$$

根据衍射效率随驱动功率单调增加的要求，估计该声光器件在  $0\text{-}450\text{mW}$  功率范围内可实现信号不失真传递 [4]。

## (3) 喇曼-奈斯条件下的衍射角和衍射效率



超声波频率调至 100MHz，功率输出调至 200mW 不变，调节声光器件水平转角，使在示波器上 0 级光两侧出现强度相等、峰位对称的 +1 和-1 级衍射光。

Table 1 0 级,±1 级衍射角偏移量和衍射强度

衍射级数	+1 级	0 级	-1 级
偏移量 X(div)	3.4	0	3.4
衍射强度 I(div)	0.5	4.5	0.5

用公式 (12)(13) 求得 1 级衍射角  $\phi = 0.0142\text{rad}$ ，参考值  $\phi_0 = 0.0154\text{rad}$ ，相对误差  $\beta = 8.4\%$ ，偏差较大。误差主要来自于 1、示波器读数误差，由于屏幕上波形曲线在测量时始终在横向和纵向均存在 0.1div 范围的小幅震荡，加上人工读数时存在测量误差，这会导致 X 的值有 0.1div 的偏差， $\phi$  值因而出现 0.0005rad 的偏差；2、Y 值和 D 值测量时的读数误差，若  $\Delta Y = 0.1\text{div}$ ， $\Delta D = 1\text{mm}$ ，总共贡献约 0.0003rad 的偏差；修正后的相对误差  $\beta = 2.8\%$ ，可以接受。

1 级衍射效率  $\eta = \frac{I_1}{I_{total}} = 9.1\%$ ，远小于布拉格衍射的最大效率 95.2%，说明声光器件在喇曼-奈斯条件下衍射效率较低，符合理论预期。

## 五、 结论

本实验验证了晶体的电光效应和声光效应的基本理论，并测定了关键参数：

### (1) 电光效应：

直流偏置下用极值法测量半波电压  $U_\pi = 265\text{V}$ ，计算得到  $\text{LiNbO}_3$  晶体的电光系数  $\gamma_{22} = 8.36 \times 10^{-12}\text{mV}^{-1}$ ，并分析了电光调制曲线的特性。交流调制下测量 2 次倍频失真直流电压之差，得到  $U_\pi = 295\text{V}$ ，计算得到电光系数  $\gamma_{22} = 7.53 \times 10^{-12}\text{mV}^{-1}$ ，与直流偏置下的结果的相对误差为  $\beta = 10.1\%$ 。

通过 1/4 波片调制，发现当直流偏置为 0 时，旋转 1/4 波片一周仅出现 2 次倍频失真，相邻角度差  $180^\circ$ ，而当直流偏置等于  $U_0 + U_\pi$  时，出现 4 次倍频失真，相邻角度差  $90^\circ$ ，符合理论预期。

### (2) 声光效应：

通过测量 0 级与 1 级衍射光的偏移量  $X$ ，验证了  $X$  和超声波频率成线性关系，计算得到  $\text{TeO}_2$  晶体中的超声波波速  $v_s = 4108\text{m/s}$ ，与理论值  $4203\text{m/s}$  相符，相对误差 2.2%；声光互作用 3dB 带宽约为 50MHz

在布拉格衍射条件下研究了声光器件的调制曲线，发现 1 级衍射效率在特定功率范围内单调增加，但超过 450mW 后反而降低，最大衍射效率 95.2% 符合理论预测。

在喇曼-奈斯衍射条件下测量衍射角  $\phi = 0.0142\text{rad}$ ，参考值  $0.0154\text{rad}$ ，相对误差 8.4%，并观察到衍射效率较低为 9.1%，远小于布拉格衍射，符合理论预期。

## 六、 参考文献

- [1] 陈晓莉 and 王培吉. 对晶体电光调制实验中输出光波曲线特性的理论分析. 实验技术与管理, (01):34–37, 2008.
- [2] 石将建, 费阳, and 王毅. 声光效应实验的理论研究和曲线模拟. 大学物理实验, 23(04):27–30, 2010.
- [3] 倪新蕾. 电光调制及其应用. 中山大学学报论丛, (01):34–36, 2002.
- [4] 潘营利. 声光布拉格衍射的研究及其应用. 河南科学, 33(12):2127–2130, 2015.
- [5] 孙为张国林, 邵长金. 晶体电光调制实验中半波电压的测定. 实验技术与管理, (02):102–105, 2003.