

# 实验七 电光调制

## 一 实验目的

1. 了解电光调制器的工作原理及特性。
2. 掌握电光晶体的特性，及其参数测量方法。

## 二 实验原理

### 2.1 晶体的电光效应

某些光学介质受到外电场作用时，它的折射率将随着外电场变化，并且介电系数（折射率）与方向有关，在光学性质上变为各向异性，这就是电光效应[22]。电光效应可用如下方程表示：

$$n(E) = n_0 + aE + bE^2 + \dots \quad (7.1)$$

其中 $E$ 为所加外电场的大小， $n_0$ 为不加电场时的折射率， $a$ ， $b$ 为与晶体结构有关的常数。电光效应有两种，一种是折射率的变化量与外电场强度的一次方成比例，称为一次电光效应，或泡克耳斯（Pockels）效应，对应方程(7.1)中的第二项 $aE$ 。另一种是折射率的变化量与外电场强度的二次方成比例，称为克尔（Kerr）效应，对应方程(7.1)中的第三项。一次电光效应只能发生在不具有中心对称的晶体中，而二次电光效应可以在任何结构的晶体中发生。但是一次电光效应要比二次电光效应强的多。利用克尔效应制成的调制器，称为克尔盒，其中的光学介质为具有电光效应的液体有机化合物。利用泡克耳斯效应制成的调制器，称为泡克耳斯盒，其中的光学介质为非中心对称的电光晶体。泡克耳斯盒又有纵向调制器和横向调制器两种，图 7.1是几种电光调制器的结构示意图。

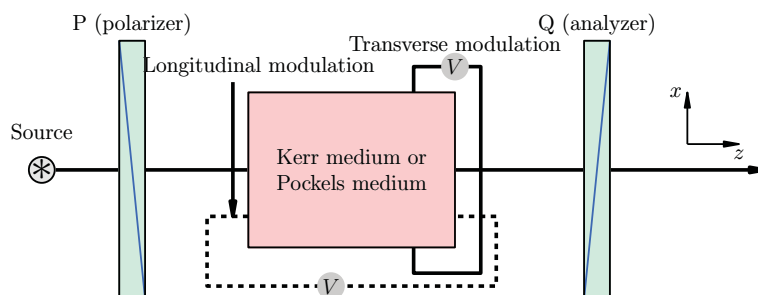


图 7.1: 电光调制器的基本结构。

当不给克尔盒加电压时，盒中的介质是透明的，各向同性的非偏振光经过 $P$ 后变为振动方向平行 $P$ 光轴的平面偏振光。通过克尔盒时不改变振动方向。到达 $Q$ 时，因光的振动方向垂直于 $Q$ 光轴而被阻挡（ $P$ 、 $Q$ 分别为起偏器和检偏器，安装时，它们的光轴彼此垂直），所以 $Q$ 没有光输出。当给克尔盒加以电压时，盒中的介质则因有外电场的作用而具有单轴晶体的光学性质，光轴的方向平行于电场。这时，通过它的平面偏振光则改变其振动方向。所以，经过起偏器 $P$ 产生的平面偏振光，通过克尔盒后，振动方向就不再与 $Q$ 光轴垂直，而是在 $Q$ 光轴方向上有光振动的分量。所以，此时 $Q$ 就有了光输出。 $Q$ 的光输出强弱，与盒中的介质性质、几何尺寸、外加电压大小等因素有关。对于结构已确定的克尔盒来说，如果外加电压是周期性变化的，则 $Q$ 的光输出必然也是周期性变化的，由此即可实现对光信号的调制。

根据通光方向与施加的电场方向的相对关系，电光效应可分为纵向电光效应（电场方向与光传播方向平行）和横向电光效应（电场方向与光传播方向垂直）。利用纵向电光效应的调制，叫做纵向电光调制，例如（ $KD^*P$ 晶体）；利用横向电光效应的调制，叫做横向电光调制，例如（ $LiNbO_3$ 晶体）。

泡克耳斯盒内所装的介质具有泡克耳斯效应，它在自然状态下就有单轴晶体的光学性质。安装时，通常使晶体的光轴平行于入射光线。因此，纵向调制的泡克耳斯盒，电场平行于光轴，横向调制的泡克耳

斯盒，电场垂直于光轴。二者相比，横向调制的两电极间距离短，所需的电压低，而且可采用两块相同的晶体来补偿因温度因素所引起的自然双折射，但横调的泡克耳斯盒的调制效果不如纵调的好，目前这两种形式的器件都很常用。

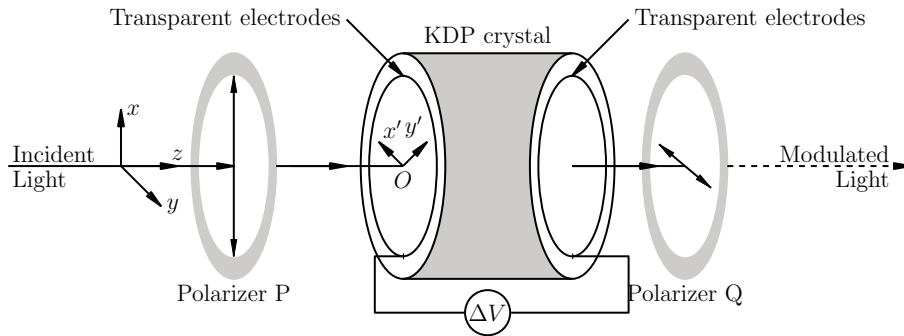


图 7.2: 纵向调制的泡克耳斯晶体的电光调制器。

图7.2为纵向调制的泡克耳斯电光调制器。在不给泡克耳斯盒加电压时，由于P产生的偏振光平行于光轴方向入射到晶体上，所以它在晶体中不产生双折射，也不分解为 $o$ 、 $e$ 光。当光离开晶体达到Q时，光的振动方向没变，仍平行于M。因M垂直于N，故入射光被Q完全阻挡，Q无光输出。当给泡克耳斯盒加以电压时，电场会使晶体感应出一个新的光轴 $ox'$ 。 $ox'$ 的方向发生于同电场方向相垂直的平面内。由于这种电光效应，便使晶体产生了一个附加的各向异性。使晶体对于振动方向平行于 $x'$ 和平行于 $y'$ 的两种偏振光的折射率不同，因此这两种光在晶体中传播速度也就不同。当它们达到晶体的出射端时，它们之间则存在着一定的相位差。合成后，总光线的振动方向就不再与Q的光轴N垂直，而是在N方向上有分量，因此，这时Q则有光输出。泡克耳斯效应的响应时间也特别快，而且 $\phi$ 与U成线性关系，所以多用泡克耳斯盒来作电光调制器。

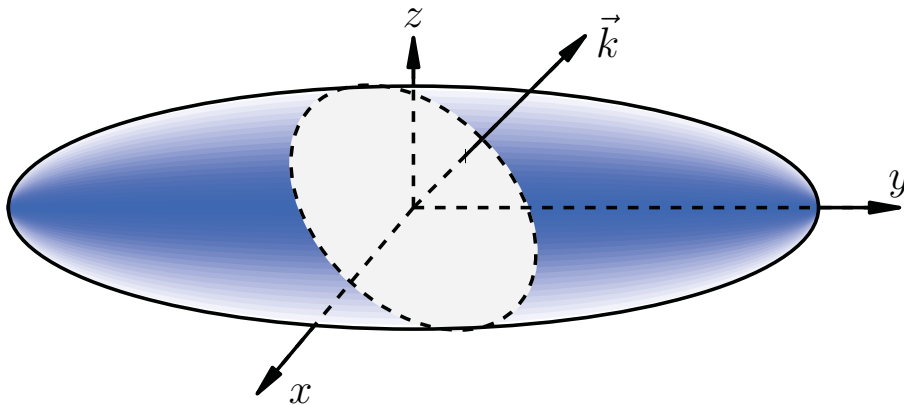


图 7.3: 电光晶体的折射率椭球。

在各向异性晶体中，因光场的电矢量振动方向不同，光的折射率也不同。人们通常用折射率椭球来描述折射率与光的传播方向、振动方向的关系，如图7.3所示。在主轴坐标中，折射率椭球方程为

$$\frac{x^2}{n_1^2} + \frac{y^2}{n_2^2} + \frac{z^2}{n_3^2} = 1 \quad (7.2)$$

其中 $n_1$ ， $n_2$ 和 $n_3$ 为折射率椭球三个主轴长度，通常称为主轴折射率。利用折射率椭球，可以方便的确定晶体中不同传播方向和偏振状态下的折射率，方法如下：过椭球中O心沿光的传播方向作一矢量 $\vec{k}$ ，然后过O作一垂直于 $\vec{k}$ 的平面，平面与椭球的截面就表示不同偏振状态时的折射率大小。

当晶体加上外电场时，折射率椭球的大小和方向都发生变化，成为一般形式的椭圆方程：

$$\frac{x^2}{n_{11}^2} + \frac{y^2}{n_{22}^2} + \frac{z^2}{n_{33}^2} + \frac{2xy}{n_{12}^2} + \frac{2yz}{n_{23}^2} + \frac{zx}{n_{13}^2} = 1 \quad (7.3)$$

由于晶体的各向异性，不同方向上电场的变化不同，在一次电光效应时，理论分析表明，折射率分布可

以表示为：

$$\begin{pmatrix} 1/n_{11}^2 - 1/n_1^2 \\ 1/n_{22}^2 - 1/n_2^2 \\ 1/n_{33}^2 - 1/n_3^2 \\ 1/n_{23}^2 \\ 1/n_{13}^2 \\ 1/n_{12}^2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \gamma_{11} & \gamma_{12} & \gamma_{13} \\ \gamma_{21} & \gamma_{22} & \gamma_{23} \\ \gamma_{31} & \gamma_{32} & \gamma_{33} \\ \gamma_{41} & \gamma_{42} & \gamma_{43} \\ \gamma_{51} & \gamma_{52} & \gamma_{53} \\ \gamma_{61} & \gamma_{62} & \gamma_{63} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_x \\ E_y \\ E_z \end{pmatrix} \quad (7.4)$$

此式是一次电光效应的普遍形式，其中 $\gamma_{ij}$  ( $i = 1, 2, 3, j = 1, 2, 3, 4, 5, 6$ )称为电光系数，共有18个分量。对于具有一定对称性的晶体，其中某些系数可能为零。本实验采用的LiNbO<sub>3</sub>晶体的横向调制电光效应。对于该晶体属于三角晶系，具有3m对称结构，其折射率椭球为：

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

其中 $n_o$ 和 $n_e$ 分别为晶体的寻常光（下标O代表Ordinary）折射率和非寻常光折射率。其线性电光系数为：

$$\gamma = \begin{pmatrix} 0 & -\gamma_{22} & \gamma_{13} \\ 0 & \gamma_{22} & \gamma_{13} \\ 0 & 0 & \gamma_{13} \\ 0 & -\gamma_{51} & 0 \\ \gamma_{51} & 0 & 0 \\ -\gamma_{22} & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

由于具有较大的电光系数，铌酸锂晶体的应用非常普遍，其电光系数 $\gamma_{22} = 6.8 \times 10^{-12} \text{m/V}$ 。在我们实验中所用的红光波长 $\lambda = 632.8 \text{nm}$ 处， $n_o = 2.2956$ ， $n_e = 2.2044$ 。

## 2.2 静态与动态电光调制特性

设光波沿 $z$ 方向传播，外加电场方向为 $x$ ，则外加电场下折射率椭球发生变化，在垂直光轴的的平面内，折射率椭球由圆形变为椭圆形，此时的椭圆方程为：

$$\left(\frac{1}{n_o^2} - \gamma_{22}E_x\right)x^2 + \left(\frac{1}{n_o^2} + \gamma_{22}E_x\right)y^2 - 2\gamma_{22}E_xxy = 1$$

经过简单的代数运算，可将上述方程变为标准的椭圆方程，即：

$$\frac{x'^2}{n_{x'}^2} + \frac{y'^2}{n_{y'}^2} = 1$$

其中

$$n_{x'} = n_o + \frac{1}{2}n_o^3\gamma_{22}E_x, \quad n_{y'} = n_o - \frac{1}{2}n_o^3\gamma_{22}E_x$$

在上述计算过程中，用到了如下的近似条件 $n_o^2\gamma_{22}E_x \ll 1$ 。上述结果表明，在垂轴平面内，原来各个方向偏振光的折射率都是 $n_o$ ，但加上 $E_x$ 后发生了变化，不同方向偏振的光折射率不同。正是利用这种电光调制原理，可以实现非常多的应用。

当一束光入射到晶体上时，为方便起见，假设电场在感生折射率主轴 $x'$ 和 $y'$ 上的复振幅相等，即 $E_{x'}(0) = E_{y'}(0) = A$ 。则经过长度为 $l$ ，两侧电压为 $V$ 的晶体后，两方向的复振幅发生了相对变化，即

$$E_{x'}(l) = A, \quad E_{y'} = A \exp(-i\delta), \quad (7.5)$$

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda}(n_{x'} - n_{y'})l = \frac{2\pi}{\lambda}n_o^3\gamma_{22}U \frac{l}{d} \quad (7.6)$$

通过 $y$ 方向的检偏器之后，透射光的振幅变为 $(E_y)_0 = \frac{A}{\sqrt{2}}(e^{i\delta} - 1)$ ，因此透射光的强度以及透射率分别为：

$$I_t \propto |(E_y)_0|^2 = 2A^2 \sin^2 \frac{\delta}{2}, \quad T = \frac{I_t}{I_i} = \sin^2 \frac{\delta}{2}$$

可见系统的透射率和外加电场有简单的三角函数关系，这就是电光调制效应。当电压增加到某一值时，经过晶体后可产生 $\lambda/2$ 的光程差，相应的相位差 $\delta = \pi$ 。此时光强透过率 $T = 100\%$ ，这时加在晶体

上的电压称作半波电压，通常用 $U_\pi$ 表示。 $U_\pi$ 是描述晶体电光效应的重要参数。在实际应用中， $U_\pi$ 越小越好。根据上面的计算和推导，不难得出半波电压与晶体结构参数之间的关系为：

$$U_\pi = \frac{\lambda}{2n_0^3 \gamma_{22}} \frac{d}{l} \quad (7.7)$$

其中 $d$ 和 $l$ 分别为晶体的厚度和长度。从中可以看出，横向电光效应的半波电压与晶片的几何尺寸有关。为了得到尽可能小的半波电压，必须使电极之间的距离 $d$ 尽可能的减少，而通光方向的长度 $l$ 尽可能的大。所以晶体通常加工成细长的扁长方体，正如实验中所用晶体的形状。

当晶体加上交变电压信号时，例如 $U(t) = U_0 + U_m \sin \omega t$ ，则透射率（透射光强）也随时间变化，其变化规律为：

$$T = \sin^2 \frac{\pi U(t)}{2U_\pi} = \sin^2 \left[ \frac{\pi}{2U_\pi} (U_0 + U_m \sin \omega t) \right] \quad (7.8)$$

其中 $U_0$ 为直流偏压， $U_m \sin \omega t$ 为交变分量。由此可见，透射率 $T$ 随 $U(t)$ 的变化是非线性的，若工作点 $U_0$ 选择不合适，输出信号会发生较大畸变。但在 $U_\pi/2$ 附近有一部分近似直线，这一部分成为线性工作区；此时 $\delta = \pi/2$ ， $T = 50\%$ 。

下面给出不同偏压和调制振幅时的输出特性。

1. 当 $U_0 = U_\pi/2$ ， $U_m \ll U_\pi$ 时，可获得很高效率的线性调制，此时的透射率为

$$T = \sin^2 \left[ \frac{\pi}{4} + \frac{\pi U_m}{2U_\pi} \sin \omega t \right] = \frac{1}{2} \left[ 1 + \sin \left( \frac{\pi U_m}{U_\pi} \sin \omega t \right) \right] \quad (7.9)$$

$$= \frac{1}{2} \left[ 1 + \frac{\pi U_m}{U_\pi} \sin \omega t \right] \quad (7.10)$$

此时，调制器输出的波形和调制信号波形的频率相同，即线性调制。

2.  $U_0 = U_\pi/2$ ， $U_m > U_\pi$ 时，调制器的工作点仍在线性区域中心，但是不满足小信号要求。此时 $\sin(\frac{\pi U_m}{U_\pi} \sin \omega t)$ 的展开项中包含高频 $\sin(n\omega t)$  ( $n = 2, 3, \dots$ )项。因此输出波形会失真。
3. 当 $U_0 = 0$ 时，可以得出

$$T \approx \frac{1}{8} \left( \frac{\pi U_m}{U_\pi} \right)^2 (1 - \cos 2\omega t)$$

当 $U_0 = U_\pi$ 时，可以得出

$$T \approx 1 - \frac{1}{8} \left( \frac{\pi U_m}{U_\pi} \right)^2 (1 - \cos 2\omega t)$$

可以看到，这两种情况下，输出波形都会产生倍频失真。

### 三 实验装置与操作

本实验要求正确搭建光路，测量出所给铌酸锂晶体的静态调制曲线，并计算出该晶体的半波电压 $U_\pi$ ；同时，根据晶体的尺寸以及所给出的电光系数，计算出理论的半波电压值；试比较理论值与实验值之间的差异，并说明可能的原因。

#### 3.1 实验光路图

实验光路参见图7.4。

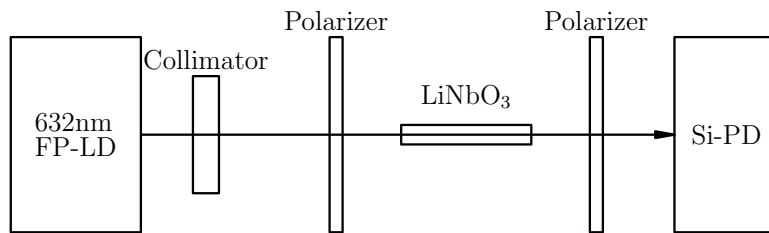


图 7.4: LiNbO<sub>3</sub>晶体静态特性曲线测量光路图。

### 3.2 静态特性曲线测量

1. 按图 7.4所示结构放置各光学器件，并调节支架高度至各光学器件等高同轴。
2. 将635nm半导体激光器控制电缆连接至LD1.OUT，设置驱动电流 $I_c$ 为30mA。
3. 将LiNbO<sub>3</sub>晶体控制电压驱动端连接至直流电压信号源输出AMP.OUT和AMP.GND。置AMP于直流高压信号源模式(HVS)。
4. 将Si-PD信号输出连接至PD1.IN，测量时注意选择合适量程。
5. 将LiNbO<sub>3</sub>晶体从测试光路中移开，将起偏器偏振方向调至与水平面成45°角，再将检偏器调至与其正交。然后将LiNbO<sub>3</sub>晶体放回测试光路，调节其空间位置和倾斜角度，使入射光束与其表面垂直。
6. 从0开始设置直流电压信号源输出电压 $V$ ，记录PD1读数 $P$ 。
7. 0至200V每隔10V测一个点，记录相应的电压 $V$ 和测量到的光电流 $P$ ，对光强 $P$ 数据作归一化处理，求得相对光强 $I$ ，作 $I \sim V$ 曲线，然后求出LiNbO<sub>3</sub>晶体半波电压 $U_\pi$ 。

### 3.3 调制特性曲线测量

在上一步实验的基础上，测量铌酸锂晶体的动态调制曲线。

1. 将电压直流分量调至半波电压，然后再加上电压幅度 $U_m 0.1U_\pi$ 的调制交变信号，观察记录其输出信号波形。
2. 将 $U_m$ 调至大于 $0.5U_\pi$ ， $0.8U_\pi$ 以及 $U_\pi$ ，观察输出调制信号。
3. 将直流偏置电压从 $U_\pi$ 改为0，重复以上步骤，观察输出波形，以及其失真情况，并与理论结果相对比。

## 四 思考题

完成实验后，请思考如下的问题

1. 如果光束没有垂直透过铌酸锂晶体，而是有一很小的夹角 $\theta$ ，那么此时所测量的半波电压有什么变化？如何判断光束是否垂直通过所测量的铌酸锂晶体？
2. 如果检偏器和起偏器没有正交，对静态 / 动态调制曲线会产生什么影响？