

## 铌酸锂 (LiNbO<sub>3</sub>) 晶体电光调制器的性能测试

铌酸锂 (LiNbO<sub>3</sub>) 晶体是目前用途最广泛的新型无机材料之一, 它是很好的压电换能材料, 铁电材料, 电光材料, 非线性光学材料及表面波基质材料。电光效应是指对晶体施加电场时, 晶体的折射率发生变化的效应。有些晶体内部由于自发极化存在着固有电偶极矩, 当对这种晶体施加电场时, 外电场使晶体中的固有偶极矩的取向倾向于一致或某种优势取向, 因此, 必然改变晶体的折射率, 即外电场使晶体的光率体发生变化。铌酸锂调制器, 应具有损耗低、消光比高、半波电压低、电反射小的高可靠性的性能。

### 【实验目的】

1. 了解晶体的电光效应及电光调制器的基本原理性能.
2. 掌握电光调制器的主要性能消光比和半波电压的测试方法
3. 观察电光调制现象

### 【实验仪器】

1. 激光器及电源
  2. 电光调制器(铌酸锂)
  3. 电光调制器驱动源
  4. 检流计
  5. 示波器
  6. 音频输出的装置
  7. 光具台及光学元件

### 【实验原理】

#### 1. 电光效应原理

某些晶体在外电场作用下, 构成晶体的原子、分子的排列和它们之间的相互作用随外电场  $E$  的改变发生相应的变化, 因而某些原来各向同性的晶体, 在电场作用下, 显示出折射率的改变。这种由于外电场作用而引起晶体折射率改变的现象称为电光效应。折射率  $N$  和外电场  $E$  的关系如下:

$$\frac{1}{n^2} - \frac{1}{n_0^2} = rE + RE^2 + \quad (1)$$

式中,  $n_0$  为晶体未加外电场时某一方向的折射率,  $r$  是线性电光系数,  $R$  是二次电光系数。通常把电场一次项引起的电光效应叫线性电光效应, 又称泡克尔斯效应; 把二次项引起的电光效应叫做二次电光效应, 又称克尔效应。其中, 泡克尔斯效应只在无对称中心的晶体中才有, 而克尔效应没有这个限制。只有在无对称中心的晶体中, 与泡克尔斯效应相比, 克尔效应较小, 通常可忽略。

目前普遍采用线性电光效应做电光调制器, 这样就不再考虑 (1) 式中电场  $E$  的二次项和高次项。因此 (1) 式为:

$$\Delta\left(\frac{1}{n^2}\right) = \frac{1}{n^2} - \frac{1}{n_0^2} = rE \quad (2)$$

利用电光效应可以控制光的强度和位相，其在光电技术中得到广泛的应用，如激光通讯、激光显示中的电光调制器、激光的 Q 开关、电光偏转等。

在各向同性的晶体中，折射率  $n$  与介电系数  $\epsilon$  均为常量，且  $n^2 = \epsilon$ ，但在各向异性晶体中，介电系数不再是个常量，而是一个二阶张量，为  $\epsilon_{ij}$ ，这样折射率  $n$  也就随介电系数的变化而呈现出各向异性的性质，在不同的方向上随  $\epsilon_{ij}$  的不同而有所不同。为明确表示在各方向上相应的折射率值，因此把  $n$  写成  $\epsilon_{ij}$ ，所以 (2) 式成为：

$$\Delta\left(\frac{1}{n^2}\right)_{ij} = \frac{1}{n_{ij}^2} - \frac{1}{n_0^2} = r_{ijk} E_k \quad (3)$$

$$(i, j, k, = 1, 2, 3)$$

这里， $r_{ijk}$  是一个三阶张量，因为它仅映了一个二阶张量  $\epsilon_{ij}$  和一个一阶张量  $E_k$  的关系。

三阶张量  $r_{ijk}$  应有  $3^3=27$  个分量，但由于介电系数  $\epsilon_{ij}$  是二阶对称张量，它只有 6 个分量，这就便各  $r_{ijk}$  最多只有 18 个分量，而不是 27 个分量了。因此通常将  $r_{ijk}$  的三个脚标简化为二个脚标，即：

$$r_{ijk} \rightarrow r_{ik}$$

$ij \rightarrow i$  的简化规则如下：

$$\begin{array}{ccc} 11 \rightarrow 1 & 22 \rightarrow 2 & 33 \rightarrow 3 \\ \left. \begin{array}{l} 23 \\ 32 \end{array} \right\} \rightarrow 4 & \left. \begin{array}{l} 31 \\ 13 \end{array} \right\} \rightarrow 5 & \left. \begin{array}{l} 12 \\ 21 \end{array} \right\} \rightarrow 6 \end{array}$$

这样  $r_{ijk}$  就缩写成  $r_{ik}$ ，但在习惯上仍写作  $r_{ij}$ ，并且可以写成六行三列的矩阵形式：

$$r_{ij} = \begin{vmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \\ r_{41} & r_{42} & r_{43} \\ r_{51} & r_{52} & r_{53} \\ r_{61} & r_{62} & r_{63} \end{vmatrix}$$

通过脚标的简化，公式(3)就可写成：

$$\Delta\left(\frac{1}{n^2}\right)_i = \frac{1}{n_{ij}^2} - \frac{1}{n_0^2} = r_{ij} E_j \quad (4)$$

由于晶体的对称性，电光系数的 18 个分量，有些分量是相等的，有些分量又等于零，因此只有有限的几个独立分量，例如铌酸锂 (LiNbO<sub>3</sub>) 晶体，其电光系数只有四个独立分量，其形式如下：

$$r_{ij} = \begin{vmatrix} 0 & -r_{22} & r_{13} \\ 0 & r_{22} & r_{13} \\ 0 & 0 & r_{23} \\ 0 & r_{52} & 0 \\ r_{51} & 0 & 0 \\ r_{61} & 0 & 0 \end{vmatrix}$$

## 2. 折射率椭球

对于各向异性的晶体来说，在不同方向上晶体具有不同的折射率。如果在晶体中任选一点 0，从 0 点出发向各个方向作矢量，使矢量长度等于该方向的折射率时，矢量的端点构成一个椭球面，称这个椭球面为折射率椭球，并用它来描述晶体的光学性质。如果晶体是各向同性的，折射率椭球就简化为一个球面。晶体的电光效应可以用折射率椭球随电场的变化来描述。

在单轴晶体中，如果选取的直角坐标系的三个轴  $X_1$ ， $X_2$ ， $X_3$  与折射率的三个主轴重合，则在晶体未加外电场时，折射率椭球方程为：

$$\frac{1}{n_{10}^2} X_1^2 + \frac{1}{n_{20}^2} X_2^2 + \frac{1}{n_{30}^2} X_3^2 = 1 \quad (5)$$

这里， $n_{10}$ ， $n_{20}$ ， $n_{30}$  为晶体的主折射率。当在晶体上加一外电场  $E(E_1, E_2, E_3)$  后，由于一次电光效应，晶体各方向上的折射率发生了变化，因而折射率椭球也相应地发生变

化，此时折射率椭球的一般表达式为：

$$\frac{1}{n_1^2} X_1^2 + \frac{1}{n_2^2} X_2^2 + \frac{1}{n_3^2} X_3^2 + \frac{1}{n_4^2} X_3 X_2 + \frac{1}{n_5^2} X_3 X_1 + \frac{1}{n_6^2} X_1 X_2 = 1 \quad (6)$$

在(6)式中包含了交叉项  $X_3 X_2$  等等，表示  $X_1$ 、 $X_2$ 、 $X_3$  不再是折射率椭球的主轴了。

下面讨论一下折射率椭球的变化规律，即怎样确定表征椭球的方程(6)中的各项系数。

当外电场  $E=0$  时，(6)式还原成(5)式，有：

$$\begin{aligned} \frac{1}{n_1^2} &= \frac{1}{n_{10}^2} & \frac{1}{n_2^2} &= \frac{1}{n_{20}^2} & \frac{1}{n_3^2} &= \frac{1}{n_{30}^2} \\ \frac{1}{n_4^2} &= \frac{1}{n_5^2} = \frac{1}{n_6^2} & & & & = 0 \end{aligned}$$

当在晶体上加一外电场 ( $E_1$ ,  $E_2$ ,  $E_3$ ) 后，则根据泡克尔斯效应式(4)有如下关系：

$$\left. \begin{aligned} \Delta\left(\frac{1}{n^2}\right)_1 \frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_{10}^2} &= r_{11} E_1 + r_{12} E_2 + r_{13} E_3 \\ \Delta\left(\frac{1}{n^2}\right)_2 \frac{1}{n_2^2} - \frac{1}{n_{20}^2} &= r_{21} E_1 + r_{22} E_2 + r_{23} E_3 \\ \Delta\left(\frac{1}{n^2}\right)_3 \frac{1}{n_3^2} - \frac{1}{n_{30}^2} &= r_{31} E_1 + r_{32} E_2 + r_{33} E_3 \\ \Delta\left(\frac{1}{n^2}\right)_4 \frac{1}{n_4^2} &= r_{41} E_1 + r_{42} E_2 + r_{43} E_3 \\ \Delta\left(\frac{1}{n^2}\right)_5 \frac{1}{n_5^2} &= r_{51} E_1 + r_{52} E_2 + r_{53} E_3 \\ \Delta\left(\frac{1}{n^2}\right)_6 \frac{1}{n_6^2} &= r_{61} E_1 + r_{62} E_2 + r_{63} E_3 \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

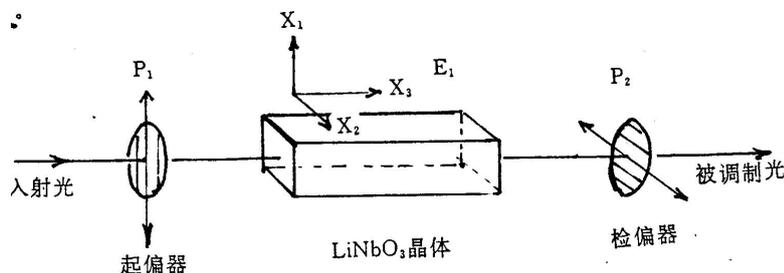
(7)式以矩阵相乘的形式表示可以写成：

$$\begin{pmatrix} \Delta \left( \frac{1}{n^2} \right)_1 \\ \Delta \left( \frac{1}{n^2} \right)_2 \\ \Delta \left( \frac{1}{n^2} \right)_3 \\ \Delta \left( \frac{1}{n^2} \right)_4 \\ \Delta \left( \frac{1}{n^2} \right)_5 \\ \Delta \left( \frac{1}{n^2} \right)_6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \\ r_{41} & r_{42} & r_{43} \\ r_{51} & r_{52} & r_{53} \\ r_{61} & r_{62} & r_{63} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{pmatrix} \quad (8)$$

### 3. 电光调制

本实验用的是铌酸锂晶体，至于别的晶体，由于其对称性不同，相应的电光系数也不同，其具体形式也有所不同，而对于同一类型的晶体，如果其工作状态不同，其具体形式也有所不同，但推理过程相类似。

本实验中，对于铌酸锂晶体利用其一次电光效应，制成调制器用来调制激光的光强，称为振幅调制。



图一

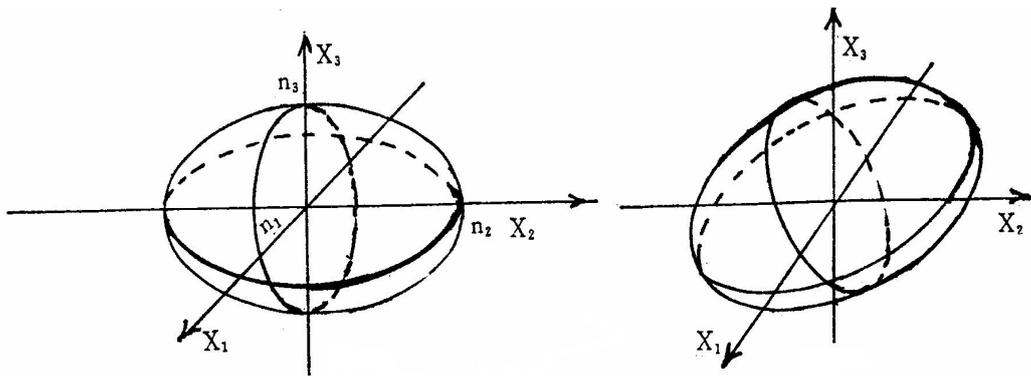
图一所示，入射光经起偏振器射到晶体上，光通过晶体后由检偏器检测。其起偏器的振动面平行与  $X_1$  轴，检偏器的偏振面平行与  $X_2$  轴，入射光沿  $X_3$  即光轴方向传播，其中  $X_1, X_2, X_3$  三个轴的方向就是晶体的三个结晶轴的方向，以上部件组成光振幅调制，其输出端的光强度（经检偏器后）将由加到晶体上的电压来调制。具体情况如下：

(1) 铌酸锂晶体加电压后的折射率的变化，即折射率椭球随电场变化而变化的情况

铌酸锂晶体是负单轴晶体，在  $\lambda = 6238\text{\AA}$  时，其  $n_0 = 2.286$ ， $n_e = 2.200$ ，当外电场零时，其折射率椭球方程为：

$$\frac{1}{n_0^2} X_1^2 + \frac{1}{n_0^2} X_2^2 + \frac{1}{n_0^2} X_3^2 = 1 \quad (9)$$

此方程表示是一个以  $X_3$  轴为旋转轴的旋转椭球，如图二所示， $n_1 = n_2 = n_0$  为寻常光折射率， $n_3 = n_e$  为非寻常光折射率。

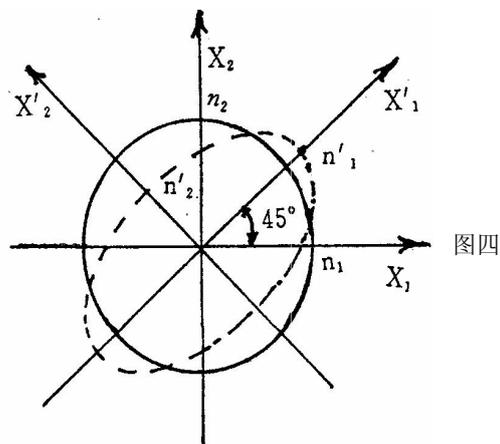


图二

图三

如图一所示，当在铌酸锂晶体的  $X_1$  方向加电场  $E_1$  后，由于  $E_1 \neq 0, E_2 = E_3 = 0$ ，此时晶体的折射率发生了相应的变化，把铌酸锂晶体的电光系数  $r_{ij}$  值和  $E$  值的相应部分代入 (7) 式，可得到在  $X_1$  方向加电场的折射率的变化情况：

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{n_1^2} &= \frac{1}{n_0^2} \\ \frac{1}{n_2^2} &= \frac{1}{n_0^2} \\ \frac{1}{n_3^2} &= \frac{1}{n_0^2} \\ \frac{1}{n_4^2} &= 0 \\ \frac{1}{n_5^2} &= r_{51} E_1 \\ \frac{1}{n_6^2} &= -r_{22} E_1 \end{aligned} \right\} \quad (10)$$



图四

将 (10) 式代入 (6) 式：

$$\frac{1}{n_0^2} X_1^2 + \frac{1}{n_0^2} X_2^2 + \frac{1}{n_0^2} X_3^2 + 2r_{51} E_1 X_3 X_1 - 2r_{22} E_1 X_1 X_2 = 1 \quad (11)$$

把 (11) 式和 (9) 式比较，沿  $\text{LiNbO}_3$  晶体的  $X_1$  方向加电场  $E_1$  后，使折射率椭球的开状发生了变化，从 (11) 式可以看出，折射率椭球的主轴不再是  $X_1, X_2, X_3$  其所表示的折射率椭球的形状如图三所示。

图一中光沿  $\text{LiNbO}_3$  晶体的  $X_3$  方向通过， $X_1$  方向加电场  $E_1$  后，此时，过椭球中心而垂直于  $X_3$  轴的平面截折射率椭球的截痕为一椭圆，而在外电场为零时，此截痕为圆，如图四所示。图中实线为  $E_1 = 0$  时的截痕，虚线为  $E_1 \neq 0$  时的截痕，并且从图中可以看出，椭圆的长、短半轴已不再是  $X_1, X_2$ ，而是  $X'_1 X'_2$ ，并且在下面的叙述过程中可知， $X'_1 X'_2$  为  $X_1 X_2$  绕  $X_3$  轴旋转  $45^\circ$  而得。图中  $n_1 = n_2 = n_0$ ，而  $n'_1 \neq n'_2$ ，且有  $n'_1 > n_0, n'_2 < n_0$ 。图四所示的椭圆方程为：

$$\frac{1}{n_0^2} X_1^2 + \frac{1}{n_0^2} X_2^2 - 2r_{22}E_1 X_1 X_2 = 1 \quad (12)$$

此方程即令 (11) 式中的  $X_3=0$  后所得。此椭圆的半长轴和半短轴分别为在  $X_1$  方向加电场，在  $X_3$  方向传播的两偏振光的折射率。现在用坐标变换的方法求椭圆的半长轴和半短轴，即求其相应的折射率。

设新坐标  $X_1'$   $X_2'$  与  $X_1 X_2$  之间的关系为：

$$\begin{cases} X_1 = X_1' \cos \varphi - X_2' \sin \varphi \\ X_2 = X_1' \sin \varphi + X_2' \cos \varphi \end{cases} \quad (13)$$

代入 (13) 式，整理后得：

$$\left(\frac{1}{n_0^2} - r_{22}E_1 \sin 2\varphi\right) X_1'^2 + \left(\frac{1}{n_0^2} + r_{22}E_1 \sin 2\varphi\right) X_2'^2 - 2r_{22}E_1 \cos 2\varphi X_1' X_2' = 1 \quad (14)$$

当  $X_1'^2$ ， $X_2'^2$  为椭圆的长、短半轴时，(14) 式中应无交叉项存在，因此， $\cos 2\varphi=0$ ， $\therefore$

$$\varphi=45^\circ$$

这样 (14) 式为：

$$\left(\frac{1}{n_0^2} - r_{22}E_1\right) X_1'^2 + \left(\frac{1}{n_0^2} + r_{22}E_1\right) X_2'^2 = 1 \quad (15)$$

设  $n_1'^2$ ， $n_2'^2$  为相对于新主轴  $X_1'^2$ ， $X_2'^2$  的折射率，则：

$$\begin{cases} \frac{1}{n_1'^2} = \frac{1}{n_0^2} - r_{22}E_1 \\ \frac{1}{n_2'^2} = \frac{1}{n_0^2} + r_{22}E_1 \end{cases} \quad (16)$$

从 (16) 式可知：

$$\begin{cases} n_1' = n_0 \left(1 + \frac{1}{2} n_0^2 r_{22} E_1\right) \\ n_2' = n_0 \left(1 - \frac{1}{2} n_0^2 r_{22} E_1\right) \end{cases} \quad (17)$$

从 (17) 式可知，当晶体未加外电场时，由于光沿光轴  $X_3$  入射时不发生双折射现象，因而有  $n_1=n_2=n_0$ ，但当在  $X_1$  方向加电场  $E_1$  后，光沿  $X_3$  方向传播时发生双折射，此时

折射率椭球主轴已成为  $X'_1$ ,  $X'_2$ ,  $X'_3$ , 其主折射率分别为  $n'_1$ ,  $n'_2$ , 且有  $n'_1 \neq n'_2 \neq n_0$ , 即光沿  $X_3$  轴射入晶体时, 分解为偏振方向平行于  $X'_1$  及  $X'_2$  的两个偏振光, 且偏振方向平行于  $X'_1$  的光, 其折射率  $n'_1 > n_0$ , 传播的相速度减小, 偏振方向平行于  $X'_2$  的光, 其折射率  $n'_2 < n_0$ , 传播的相速度增大。这种现象称为电场感生双折射, 即双折射。所以图一的基本作用是利用人工双折射来实现光的调制的。

(2) 光在  $\text{LiNbO}_3$  晶体中的传播情况, 半波电压

图一, 入射光经起偏器  $P_1$  后, 获得光波矢量平行于  $X_1$  轴的偏振光, 射到晶体上, 当外电场  $E_1$  加到晶体上时, 产生人工双折射, 沿  $X_3$  方向传播的光分解为沿  $X'_1$  及  $X'_2$  方向的两个偏振光, 由于  $X'_1$ 、 $X'_2$  为  $X_1$ 、 $X_2$  绕  $X_3$  轴旋转  $45^\circ$  而得, 因此, 在入射端可以认为这两个波的振幅是相等的, 但当这两个光波进入晶体后, 由于存在电场引起的双折射, 相速度不再相同, 两个光波各按自己的相速度传播到晶体的另一端。设  $\text{LiNbO}_3$  晶体  $X_3$  方向的长度  $l$ ,  $X_1$  方向的厚度为  $d$ , 由于电场  $E$  的数值是不易测量的, 故实验中用垂直于  $E$  的两个晶体表面上的电位差 ( $V=E \cdot d$ ) 来代替。则此两光波通过晶体时产生的位相差为:

$$\begin{aligned} \delta &= \frac{2\pi}{\lambda} l(n'_1 - n'_2) \\ &= \frac{2\pi}{\lambda} \cdot l \cdot n_0^3 r_{22} E_1 \\ &= \frac{2\pi}{\lambda} n_0^3 r_{22} V \frac{l}{d} \end{aligned} \quad (18)$$

当外加电场加到某一确定值时, 两波通过晶体时产生的位相差正好等于  $\pi$ , 称此时的外加电场为半波电压, 用  $V_\pi$  或  $V \frac{\lambda}{2}$  来表示。用半波电压这一概念形象地表示: 加上这样的电压, 晶体内部的两个正交分量的光程差刚好等于半个波长, 相应的位相差等于  $\pi$ 。因此可以得到:

$$V_\pi = \frac{\lambda}{2n_0^2 r_{22}} \cdot \frac{d}{l} \quad (19)$$

半波电压是标志电光调制器的一个重要参量, 实际应用中希望愈小愈好。从 (19) 式可知, 半波电压的大小与制成调制器的材料及外形尺寸有关。为获得半波电压低的电光调制器, 首先要选用半波电压低的电光晶体材料 (必须注意: 材料的半波电压以  $d:l=1:1$  为标准), 一旦材料确定以后, 常用降低  $d/l$  的比值来达到降低调制器的半波电压。

当半波电压确定以后, 从 (18) (19) 两式中, 可以得到两波通过晶体时的位相差和外加电压之间的关系:

$$\delta = \pi \cdot \frac{V}{V_{\pi}} \quad (20)$$

### (3) LiNbO<sub>3</sub> 晶体调制器

本实验用的是铌酸锂 (LiNbO<sub>3</sub>) 晶体调制器，使用条件是沿 X<sub>1</sub> 方向加电场，沿 X<sub>3</sub> 方向透光。图一中，起偏器 P<sub>1</sub> 和检偏器 P<sub>2</sub> 正交放置。由于实验要求，沿 X<sub>3</sub> 方向的入射光经起偏器 P<sub>1</sub> 后获得电矢量平行于 X<sub>1</sub> 轴或 X<sub>2</sub> 轴的线偏振光，由于外电场的作用，进入晶体的线偏振光又分解为沿 X'<sub>1</sub>, X'<sub>2</sub> 的两个方向的线偏振光，当这两光波通过检偏器 P<sub>2</sub> 时，其透射光强度为此两波在 P<sub>2</sub> 上投影迭加的结果。具体叙述如下：

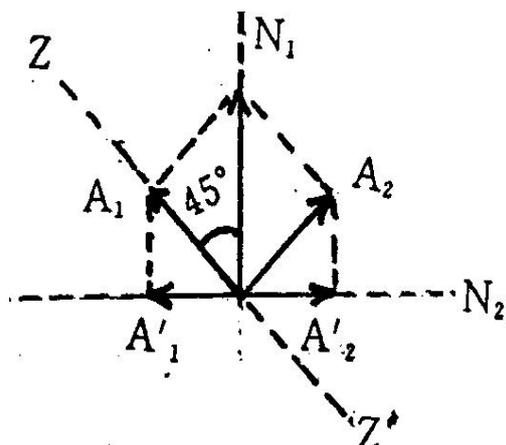
图六中，N<sub>1</sub>、N<sub>2</sub> 分别为偏振器 P<sub>1</sub>、P<sub>2</sub> 的主截面，而 Z、Z<sub>1</sub> 为晶体的主截面。设经过 P<sub>1</sub> 的入射光的光强为 I<sub>0</sub>=A<sup>2</sup>，则可得到：

$$A_1 = A \cos 45^\circ$$

$$A_2 = A \sin 45^\circ$$

在入射光波刚进入晶体的瞬间，两光无位相差，当两光通过 l 长的晶体后，由于电场引起的双折射，两光的相速度不同，产生一定的位相差，当具有这个相差的两光通过检偏器 P<sub>2</sub> 时，其在 N<sub>1</sub> 上的分量为：

$$\begin{cases} A'_1 = A_1 \cos 45^\circ = \frac{1}{2} A \\ A'_2 = A_2 \sin 45^\circ = \frac{1}{2} A \end{cases}$$



图六

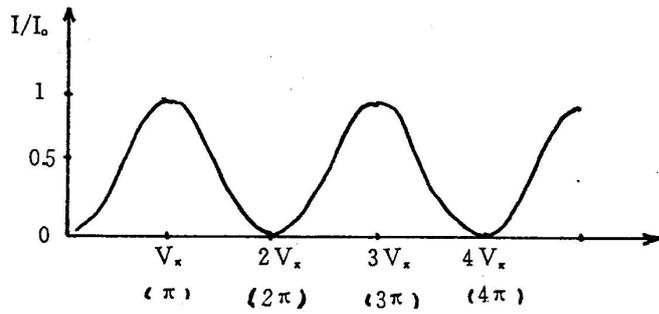
由此可见，通过检偏器的两光是同频率、等振幅、振动在同一平面的两个相干光。这两个相干光除有电场引起的位相差  $\delta$  以外，还有在 N<sub>2</sub> 上投影所引入的位相差  $\pi$ ，因而此两光的总的位相差为  $(\pi + \delta)$ 。设从检偏器后得到的输出光强为 I，则根据偏振光干涉的原理，可以得到光强 I 和输出光强 I<sub>0</sub> 之间的关系：

$$I = A_1'^2 + A_2'^2 + 2A_1'A_2' \cos(\pi + \delta)$$

$$= A^2 \sin^2 \frac{\delta}{2} \quad (21)$$

$$= I_0 \sin^2 \frac{\delta}{2}$$

从(21)式可以看出，两线偏振光之间的位相差不同，与之对应的输出光强也就不同，也就是说，输出光强随外加电压的变化而变化，因而可以通过控制外加电压的方法来达到调制输出光强的目的。



图七

从(21)式得到外加电压与输出光强之间的关系，如图七所示。从图中可以看出，当外加电压  $V=0$  时，输出光强为最小，而  $V=V_\pi$  时，输出光强达到最大，从理论上讲，当  $V=2kV_\pi$  ( $k=0, \pm 1, \pm 2, \dots$ ) 时，输出光强应等于输入光强，即达到 100% 的调制，但在实际上由于晶体的光学均匀性及加工精度，偏光器的质量与取向精度，入射光的发射角，所加电场的均匀性等因素的影响，使  $V=2kV_\pi$  时，输出光强不为零，而达到一个最小值  $I_{\min}$ ，当  $V=(2k+1)V_\pi$  时，输出光强  $I \neq I_0$ ，而达到一个最大值  $I_{\max}$ ，在一般情况下， $I_{\max} < I_0$ 。

调制器的最大输出光强与最小输出光强的比值称为调制器的消光比。它是衡量光电调制器质量的一个重要技术指标。消光比越大，说明晶体的光学质量好，加工精度高。一般情况下，调制器的消光比范围在几十到几百之间。定义消光比为：

$$M = \frac{I_{\max}}{I_{\min}} \quad (22)$$

LiNbO<sub>3</sub> 调制器的具体应用：当施外加调制信号电压于调制器，则输出光强随调制信号的变化情况，如图八所示。

图八为图七的部分进行放大。显然，如果取调制电压  $V = V_m \sin \omega t$  则从图八中曲线(1)所对应的情况来看，输出光强被调制的范围很小，而且发生了严重的畸变，所以应考虑加一个偏置电压。取

代入(21)式：

$$V = V_{DC} + V_m \sin \omega t$$

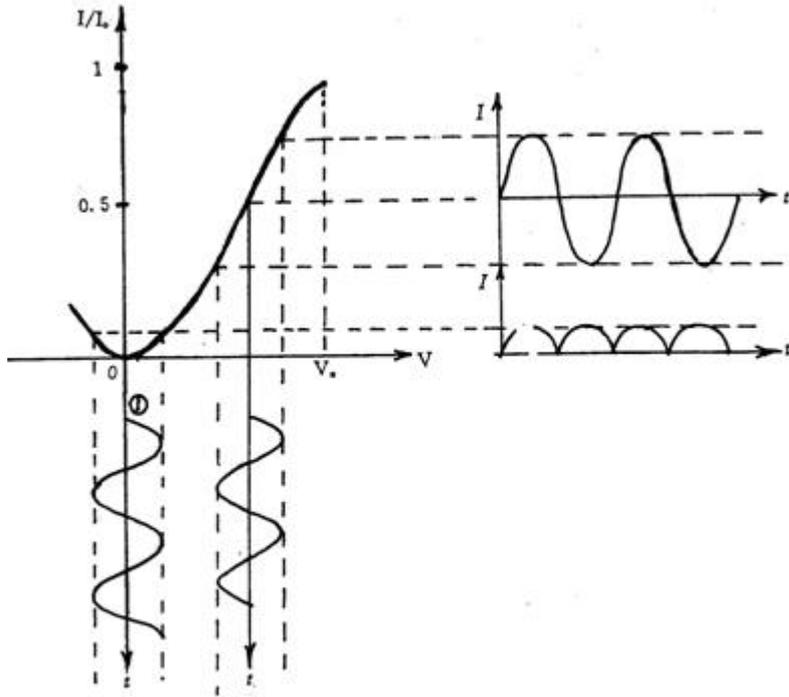


图 八

$$I = \frac{1}{2} I_0 \left[ 1 - \cos\left(\frac{\pi V_{DC}}{V_\pi}\right) \right] \cos\left(\frac{\pi V_m}{V_\pi} \sin \omega t\right) + \sin\left(\frac{\pi V_{DC}}{V_\pi}\right) \sin\left(\frac{\pi V_m}{V_\pi} \sin \omega t\right)$$

如果选取直流偏压  $V_{DC} = \frac{\pi}{2}$  则上式可为:

$$I = \frac{1}{2} I_0 \left[ 1 + \sin\left(\pi \cdot \frac{V_m}{V_\pi}\right) \right] \sin \omega t \quad (23)$$

对于线性调制, 要求  $\pi \cdot \frac{v_m}{v_\pi} \ll 1$ , 于是 (22) 式为:

$$I = \frac{1}{2} I_0 \left( 1 + \pi \cdot \frac{V_m}{V_\pi} \sin \omega t \right) \quad (24)$$

从上面的分析可以看出, 应用电光效应做振幅调制, 原则上不是线性调制。为获得线性调制, 一方面调制讯号不宜过大, 应满足  $\pi \cdot \frac{v_m}{v_\pi} \ll 1$ , 另一方面要适当选择工

作点，就是选择直流偏压  $V_{DC} = \frac{\pi}{2}$ ，此时两波产生的位相差为：

$$\delta = \pi \cdot \frac{V_{DC}}{V_{\pi}} = \frac{\pi}{2}$$

通常在调制晶体前（或后）放置一个  $\frac{\lambda}{4}$  波片，就能产生  $\frac{\pi}{2}$  的相差，这种方法叫做光学偏压。光学偏压和直流偏压是等价的，二者择其一。

选择工作点不仅有助于消除畸变，而且可获得较大的光强度调制度。

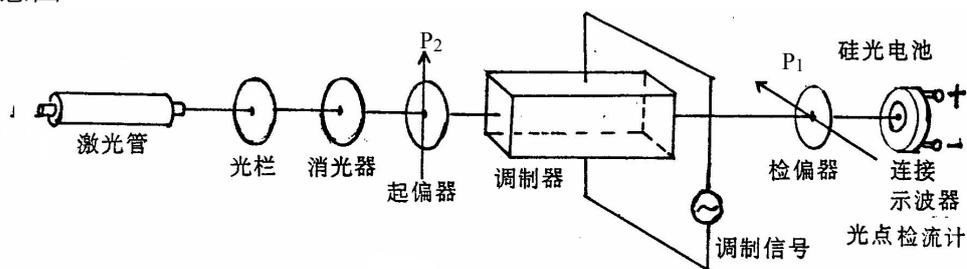
## 【实验内容及步骤】

### 1. 仪器放置

He-Ne 激光器及电源，LiNbO<sub>3</sub> 晶体调制器及驱动源、示波器、光点检流计、硅光电池、偏振器件，光具座、光栏等。以上仪器及元件按图九位置放置，电气部分应按要求联接好。

### 2. 步骤

由于本实验有高压装置，做实验时，一定要谨慎小心，注意安全。图九为实验装置示意图。



图九

①打开 He-Ne 激光电源，点燃激光管，工作电流 6mA 左右，此时激光管的正负极间电压有几千伏，要注意安全。

②调整激光束的位置，使之与光具座的中心线平行。方法是利用检验光栏在光具座上来回滑动，调节放光管位置，使激光束始终落在光栏内，则激光束的位置调整完毕。

③各光学元件先后按置在光具座上。如图九所示，使各元件表面垂直于激光束，并使 P<sub>1</sub>、P<sub>2</sub> 振动面平行。调制器的 X<sub>1</sub> 轴是垂直放置，X<sub>2</sub> 轴在水平方向上，X<sub>3</sub> 与激光束方向相平行。如何保证激光束的入射方向与 X<sub>3</sub> 轴即晶体光轴平行，而相应的起偏器与检偏器的位置又将怎样放置，这是在动手做实验以前必须解决的二个问題。

④最后将硅光电池与光点检流计相连接，连接时首先将检流计的量程调至最大，然后根据需要再选择量程，并旋转消光器使光强最大时选择合适的量程。一切检查无误后开始测量。

⑤首先测量输入光强，光使起偏器的振动面平行于 X<sub>1</sub> 轴，然后取下 LiNbO<sub>3</sub> 调制器，让检偏器的振动面与起偏器的振动面相平行，此时测得的光强就是输入光强 I<sub>0</sub>，然后调节检偏器与起偏器的振动面相互正交，放上 LiNbO<sub>3</sub> 调制器并使之共轴，然后按实验要求继续测量。

⑥由于是用硅光电池与光点检流计组合来接收光强，所以本实验中，光强的值实际上是检流计上的电流读数，但由于在计算过程中，只取 I/I<sub>0</sub> 的相比值，所以并不影响实验结果的正确性。

### 3. 内容

①测  $\text{LiNbO}_3$  调制器的消光比和半波电压，改变加在调制器上的直流电压值，分别求出当  $V_{\text{DC}}=0$ ， $V_{\text{DC}}=V_{\pi}$  时对应的输出光强  $I_{\text{min}}$ ， $I_{\text{max}}$ ，反复测量，取其平均值，求出消光比和半波电压。并将半波电压的实验值和理论值相比较，并分析原因。这里有：

$$\lambda = 6328 \text{ \AA} \quad n_o = 2.286, \quad r_{22} = 6.8 \times 10^{-10} \text{ Cm/V}, \quad d = 3 \text{ mm}, \quad L = 50 \text{ mm}$$

②观察在  $\text{LiNbO}_3$  调制器上的交变信号时，输出光强被调制的情况。分三种情况讨论：

(a) 当  $V_{\text{DC}} = 0$  时输出光强被调制的情况。

(b) 当  $V_{\text{DC}} = \frac{V_{\pi}}{2}$  时输出光强被调制的情况。

(c) 当  $V_{\text{DC}}$  为任意值时输出光强被调制情况。

通过对以上三种现象的观察，你能得到什么结论？

③画出  $I / I_0 - V$  的实际关系曲线。

④画出  $\delta(v) - V$  的关系曲线，并求出  $\delta_0$  的值。

本实验用的 poekels 盒，它的位相差与外加电压的关系是：

$$\delta_{(V)} = \pi \cdot \frac{V}{V_{\pi}} + \delta_0$$

其  $V_{\pi}$  与  $\delta_0$  都是与晶体材料和切割方式有关的，并且都是波长的函数。对于有些电光晶体， $V_{\pi}$ 、 $\delta_0$  还受温度的影响。

#### 【思考题】

1. 有一块汞绿光的四分之一波片，它对红色氦氖激光，是四分之一波片吗？为什么？
2. 请设计一个方案，从  $I / I_0 - V_{\text{m}}$  线求得  $\delta(V) - V$  曲线。
3. 由  $\delta(v) - V$  曲线说明这块  $\text{LiNbO}_3$  晶体具有一级电光效应。
4. 如果入射光是直线偏振光，偏振方向与水平方向成  $30^\circ$  夹角，要使出射光波的水平振动分量比垂直振动分量多出的位相差是号，把四分之一波片放进光路时，应满足哪些条件？通过哪些步骤实现这些条件？

铌酸锂晶体 ( $\text{LiNbO}_3$ ) 由于其具有优良的铁电、压电、电光、非线性光学和声表面波性能而用途广泛。目前，已经在光波导基片、光通讯调制器、光隔离器、窄带滤波器等方面获得了广泛的实际应用，并在光子海量存储器、光学集成等方面具有广阔的应用前景，被公认为光电子时代的“光学硅”的主要候选材料之一。在光通讯中，电-光调制器就是利用电场使晶体的折射率改变这一原理制成的。电光晶体位于起偏镜和检偏镜之间，在未施加电场时，起偏镜和检偏镜相互垂直，自然光通过起偏镜后检偏镜挡住而不能通过。施加电场时，光率体变化，光便能通过检偏镜。通过检偏镜的光的强弱由施加于晶体上的电压的大小来控制，从而实现通过控制电压对光的强弱进行调制的目的。

**【参考资料】**

1. 母国光、战元令编 《光学》人民教育出版社 1978年：13章。
2. 李荫远、杨顺华编 《非线性光学》科学出版社 1974年：3章。
3. 蒋民华 《晶体物理》 山东科学技术出版社 1980