电光调制及通信应用

实验者: 周文斌 (　　)　焦润泽 (　　)　指导老师: 梁飞翔
中山大学物理学院，陆达理堂

摘　要: 本实验系统研究了铌酸锂 ($LiNbO_3$) 晶体的线性电光效应及其在光通信中的应用。通过搭建横向电光调制实验光路，采用极值法、非线性拟合法和波形法三种方法测量了晶体的半波电压，观测了不同直流偏置电压下的调制波形畸变现象，并成功实现了语音信号的电光调制与解调。实验结果表明：极值法测得半波电压为 360V，与理论值 342.925V 的相对误差为 4.98%；非线性拟合法结果为 400.74V，决定系数 R^2=0.9963；波形法测得更换仪器后的半波电压为 343V，与理论值几乎一致。实验验证了倍频失真的产生条件，证实了 λ/4 波片可替代直流偏置电压实现线性调制，并成功完成了模拟光通信实验。本实验全面掌握了电光调制的基本原理与实验技术，为高速光通信系统的研究奠定了基础。

关键词：电光调制; 铌酸锂晶体; 半波电压; 倍频失真; 模拟光通信; λ/4 波片

1 引言

电光效应是指在外加电场作用下，晶体的折射率椭球发生畸变、折射率分布随之改变的物理现象。其中无对称中心晶体表现出线性电光效应（Pokels 效应），折射率变化与电场强度成正比，具有纳秒级超快响应，是激光调制、光开关、高速光通信的核心物理基础。

铌酸锂 $LiNbO_3$ 是典型的负单轴电光晶体，具有电光系数大、透明波段宽、物理化学性质稳定等优点，被广泛制作成横向电光调制器。利用电光效应可实现光强调制、相位调制、偏振调制，在光纤通信、激光雷达、光信息处理等领域应用极其广泛。

本实验采用横向电光调制结构，研究直流偏压与交流信号共同作用下的光强调制规律；测定调制器半波电压、消光比等关键参数；观察不同工作点的调制波形畸变现象；并利用电光调制实现语音信号的调制解调，直观模拟振幅光通信的基本原理与过程。

2 实验目的

1. 理解线性 Pokels 电光效应的物理本质，掌握晶体折射率椭球在外电场下的形变规律。
2. 掌握电光调制实验光路准直、起偏器与检偏器正交调节的方法。
3. 测量电光调制器静态透过率、消光比，测绘光强-直流偏压特性曲线，求解半波电压。
4. 研究不同直流偏置工作点对交流调制波形的影响，理解线性调制、倍频畸变与截止状态的成因。
5. 掌握语音信号电光调制与解调方法，模拟简易光通信传输过程。

3 仪器用具

1. He-Ne 激光器及光源稳压电源；
2. 铌酸锂横向电光调制器组件；
3. 起偏器、检偏器；
4. 直流高压稳压电源、低频正弦信号发生器；
5. 光电接收探测器、双踪示波器；
6. 语音播放模块、解调耳机及配套电路；
7. 光具座、二维调整滑块、遮光板等光学配件。

4 实验原理

4.1 各向异性晶体的折射率

根据光的电磁理论，光是一种电磁波，在介质中传播的速度为：

$$c = \frac{c_0}{n} = \frac{1}{\sqrt{\mu\varepsilon}}$$

其中 $n^2 = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}$，$\varepsilon$ 为介电系数，是对称的二阶张量，即 $\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ji}$。因此在各向异性介质中，电位移矢量与电场的关系可以表述为：

$$\begin{pmatrix} D_x \\ D_y \\ D_z \end{pmatrix} = \varepsilon_0 \begin{pmatrix} \varepsilon_{xx} & \varepsilon_{xy} & \varepsilon_{xz} \\ \varepsilon_{yx} & \varepsilon_{yy} & \varepsilon_{yz} \\ \varepsilon_{zx} & \varepsilon_{zy} & \varepsilon_{zz} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_x \\ E_y \\ E_z \end{pmatrix}$$

对于任意一种晶体，我们总可以找到三个相互正交的特殊方向 (x, y, z)，使介电张量对角化：

$$\begin{pmatrix} D_x \\ D_y \\ D_z \end{pmatrix} = \varepsilon_0 \begin{pmatrix} \varepsilon_x & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_y & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_z \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_x \\ E_y \\ E_z \end{pmatrix}$$

这三个特殊的方向称为晶体的主轴方向，在这三个主轴方向上有：

$$D_i = \varepsilon_0 \varepsilon_i E_i \quad (i = x, y, z)$$

对应的三个主折射率为：

$$n_i = \sqrt{\varepsilon_i} \quad (i = x, y, z)$$

在各向同性的介质中，$\varepsilon_x = \varepsilon_y = \varepsilon_z = \varepsilon$，电位移矢量和电场矢量成简单的线性关系，光在这类介质中以同一速度传播。在各向异性的介质中，各方向的折射率不同，所以各偏振态的光传播速度也不同，呈现双折射现象，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。

4.2 晶体的折射率椭球

在三个主轴方向，波面的法向与光线一致，因此光波在晶体中的传播性质可以用一个折射率椭球来描述，在晶体的主轴坐标系中，折射率椭球的表达式为：

$$\frac{x^2}{n_x^2} + \frac{y^2}{n_y^2} + \frac{z^2}{n_z^2} = 1$$

其中，$n_i = \sqrt{\varepsilon_i}\ (i = x, y, z)$ 是晶体的主折射率。上式表征了对应某一波长的晶体，其主折射率在椭球空间各个方向上全部取值分布的几何图形。折射率椭球的取向和形状将受到晶体对称性的制约。如单轴晶体（以 $LiNbO_3$ 为例），$n_x = n_y = n_o$，$n_z = n_e$，因此对于单轴晶体折射率椭球方程为：

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

该方程是一个旋转对称的椭球，如图1所示。

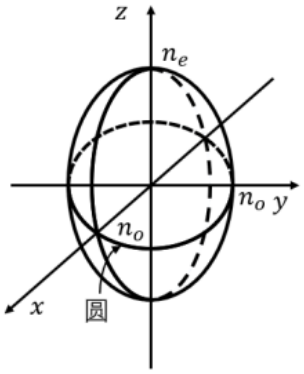


图 1:（正）单轴晶体折射率椭球

当晶体加上电场后，折射率椭球的形状、大小、方位都发生变化，椭球方程变为：

$$\frac{x^2}{n_x^2}+\frac{y^2}{n_y^2}+\frac{z^2}{n_z^2}+\frac{2yz}{n_{yz}^2}+\frac{2xz}{n_{xz}^2}+\frac{2xy}{n_{xy}^2}=1$$

上式也可以表示为：

$$\frac{x^2}{n_1^2}+\frac{y^2}{n_2^2}+\frac{z^2}{n_3^2}+\frac{2yz}{n_4^2}+\frac{2xz}{n_5^2}+\frac{2xy}{n_6^2}=1$$

在有外电场 $E(E_x,E_y,E_z)$ 的作用下时，如果折射率椭球方程的系数 $\left(\frac{1}{n^2}\right)_i$ 的变化量 $\Delta\left(\frac{1}{n^2}\right)_i$ 与电场 E 的各分量成线性关系（即仅考虑线性效应时），电场 E 作用于晶体引起折射率的变化关系为：

$$\Delta\left(\frac{1}{n^2}\right)_i=\Delta\left(\frac{1}{n^2}\right)_i\Big|_E-\Delta\left(\frac{1}{n^2}\right)_i\Big|_{E=0}=\gamma_{ij}E_j$$

其中 $i=1,2,3,4,5,6$，$j=1,2,3$。

γ_{ij} 组成的 6×3 矩阵称为晶体的线性电光张量，它的每一个元素 γ_{ij} 被称为线性电光系数，γ 是一个对称三阶张量。由于晶体的对称性，电光系数有些分量等于 0，而有些分量又相等，因而一般只会有几个有限的独立分量。若以 $LiNbO_3$ 为例，其电光系数只有 4 个独立分量：

$$\gamma_{ij}=\begin{bmatrix}0&-\gamma_{22}&\gamma_{13}\\0&\gamma_{22}&\gamma_{13}\\0&0&\gamma_{33}\\0&\gamma_{51}&0\\\gamma_{51}&0&0\\-\gamma_{22}&0&0\end{bmatrix}$$

由系数的改变与所加电场强度的线性关系以及晶体的电光系数矩阵，可以得知在外电场作用下，折射率椭球的一般方程为：

$$\left(\frac{1}{n_o^2}-\gamma_{22}E_y+\gamma_{13}E_z\right)x^2+\left(\frac{1}{n_o^2}+\gamma_{22}E_y+\gamma_{13}E_z\right)y^2+\left(\frac{1}{n_e^2}+\gamma_{33}E_z\right)z^2$$
$$+2\gamma_{51}E_y\cdot yz+2\gamma_{51}E_x\cdot xz-2\gamma_{22}E_x\cdot xy=1$$

若电场方向沿某一主轴，则其他方向上的分量为零。如电场方向和 x 轴平行，则 $E_x=E$，$E_y=E_z=0$，上式可以转化为：

$$\frac{1}{n_o^2}\left(x^2+y^2\right)+2\gamma_{51}E\cdot xz-2\gamma_{22}E\cdot xy+\frac{1}{n_e^2}z^2=1$$

用 $z=0$ 的平面与椭球相截，其截面为一个椭圆，椭圆方程为：

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

经过主轴变换后，可得：

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

显然，x' 轴、y' 轴为施加外电场后，折射率椭球的新主轴，是由原 x 轴、y 轴所在平面绕 z 轴旋转 $45°$ 所得，如图2所示。

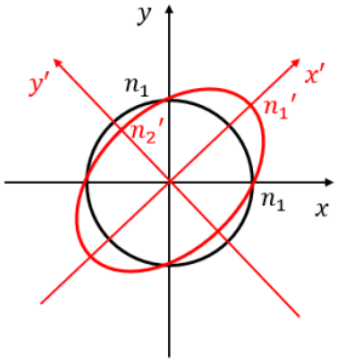


图 2: $LiNbO3$ 在沿 x 轴加电场 E 前后，折射率椭球在垂直于 z 轴的截面

用 n_1'、n_2' 表示相对于 x' 轴、y' 轴的折射率，则有：

$$\frac{1}{n_1'^2}=\frac{1}{n_o^2}-\gamma_{22}E$$

$$\frac{1}{n_2'^2}=\frac{1}{n_o^2}+\gamma_{22}E$$

展开等式两侧并略去高次项，可得：

$$n_1'=n_o+\frac{1}{2}n_o^3\gamma_{22}E$$

$$n_2'=n_o-\frac{1}{2}n_o^3\gamma_{22}E$$

$$n_3'=n_e$$

可以看到，$n_1'\neq n_2'\neq n_o$，$LiNbO_3$ 由单轴晶体变成了双轴晶体，施加电场后，椭球绕 z 轴旋转 $45°$ 并变形，原 xOy 截面由圆变为 $x'Oy'$ 面椭圆，y' 轴缩短，x' 轴变长，感应轴增长量与外加电场成线性关系。当入射光沿 z 轴方向传播，通过长度为 L 的晶体后，o 光和 e 光的相位差为：

$$\delta=\frac{2\pi}{\lambda}R=\frac{2\pi}{\lambda}L(n_2'-n_1')=\frac{2\pi}{\lambda}Ln_o^3\gamma_{22}\frac{U}{d}$$

式中，R 为光程差，$U=Ed$ 为晶体在 x 轴方向所施加的直流电压，d 为该方向上晶体的厚度。

4.3 电光相位延迟及电光补偿器

电场作用使光进入晶体后沿感应轴方向分解为两个偏振方向正交的线偏振光，它们的折射率不同，在晶体内传播一定距离后产生相应的位相差，称为电光位相延迟。例如 $LiNbO_3$ 晶体在 x 方向加电场、z 方向通光时的位相延迟量可由上式计算得出。如图3所示，其中起偏振片的偏振方向平行于电光晶体的 x 轴，检偏振片的偏振方向平行于 y 轴。因此入射光经起偏振片后变为振动方向平行于 x 轴的线偏振光，它在晶体的感应轴 x' 和 y' 上的投影的振幅和相位均相等。

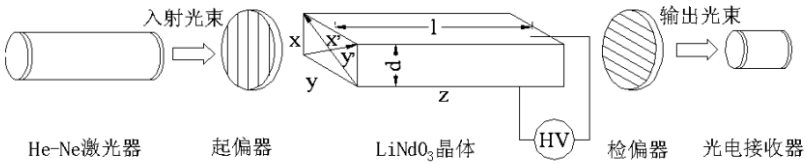


图 3: 实验装置示意图

位相延迟量和晶体的电光系数、几何尺寸和入射光波长等有关。当晶体的几何尺寸和入射光均确定时，位相差将随所加电压线性地变化，这是线性电光效应的重要特点。由此可见，δ 和加在晶体上的电压有关，当电压增加到某一值时，x' 轴和 y' 轴方向的偏振光经过晶体后可产生 $\lambda/2$ 的光程差，相应的相位差 $\delta=\pi$，这时加在晶体上的电压称作半波电压，通常用 U_π 表示。U_π 是描述晶体电光效应的重要参数，也是电光调制器的重要参数。如 $LiNbO_3$ 晶体在上述情况下 U_π 为：

$$U_\pi=\frac{\lambda}{2n_o^3\gamma_{22}}\frac{d}{L} \tag{1}$$

上述电场方向和通光方向相垂直，称为横向调制，其 U_π 值可通过调整晶体的长度厚度比 $\frac{L}{d}$ 来改变。（电场方向和通光方向平行时称为纵向调制，读者可自行推算磷酸二氘钾纵调时的 U_π 表达式，并证明其 U_π 与晶体的尺寸无关。）实用中希望选用半波电压小的调制器件，对于横调器件，$\frac{L}{d}$ 可取大些，一般商品调制器的 $\frac{L}{d}$ 值可高达 100 以上。

电光相位延迟量用半波电压表示会很方便，将上式带入相位差公式可以得到：

$$\delta=\frac{\pi}{U_\pi}\cdot U$$

已知调制器的半波电压后，可直接由所加电压控制或读出对应的位相延迟量，故电光调制器也是一种补偿器——电光补偿器，其位相延迟量可用所加电压量表示和控制，因此用电光补偿器较易实现待测样品位相量值的自动检测。许多物理量如折射率、长度、温度、应力乃至气体密度、浓度等变化均会引起位相差发生相应的变化，这些物理量微小的变化可用电光补偿器直接测量或控制。所以电光补偿器也是一种传感器。

4.4 电光强度调制

4.4.1 透过率与外加电压的关系

仍以 $LiNbO_3$ 晶体 x 轴加电场、z 轴通光的电光效应为例，下面我们讨论经电光晶体和检偏器后输出光的强度。

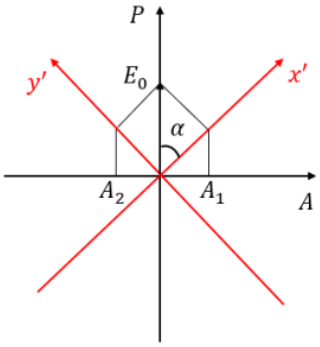


图 4: 电场作用下晶体感应轴示意图

图4表示在正交偏振场中，晶体的感应轴和起偏器 (P) 偏振轴夹角为 α，入射于晶体的线偏振光的光强为 I_0，相应振

幅为 E_0，它在 x' 轴、y' 轴上的分量为：

$$E_{x'} = E_0 \cos\alpha; \quad E_{y'} = E_0 \sin\alpha$$

经晶体后它们的相位差为：

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda}(n_{x'} - n_{y'}) \cdot L$$

由检偏器出射时，在检偏器 A 轴上的分量为：

$$E_{A_1} = E_{x'} \sin\alpha = E_0 \cos\alpha \sin\alpha; \quad E_{A_2} = E_{y'} \cos\alpha = E_0 \sin\alpha \cos\alpha$$

当 $\alpha = 45°$ 时，合成的光强为：

$$\begin{aligned} E^2 &= E_{A_1}^2 + E_{A_2}^2 + 2E_{A_1}E_{A_2}\cos(\pi + \delta) \\ &= \frac{1}{2}E_0^2\left[1 + \cos(\pi + \delta)\right] \\ &= E_0^2 \sin^2\left(\frac{\delta}{2}\right) \end{aligned}$$

$$I = I_0 \sin^2\left(\frac{\delta}{2}\right) = I_0 \sin^2\left(\frac{\pi}{2U_\pi}U\right) \tag{2}$$

可以计算出透过率 T 为：

$$T = \frac{I}{I_0} = \sin^2\left(\frac{\delta}{2}\right) = \sin^2\left(\frac{\pi}{2U_\pi}U\right) = \sin^2\frac{\pi}{2U_\pi}(U_0 + U_m \sin\omega t)$$

其中 U_0 是加在晶体上的直流电压，$U_m \sin\omega t$ 是同时加在晶体上的交流调制信号，该信号的振幅为 U_m，调制频率为 ω。从式中可以看出，改变 U_0 或 U_m，输出特性将相应的有变化。对单色光和确定的晶体来说，U_π 为常数，因而 T 将仅随晶体上所加的电压变化。如图5所示

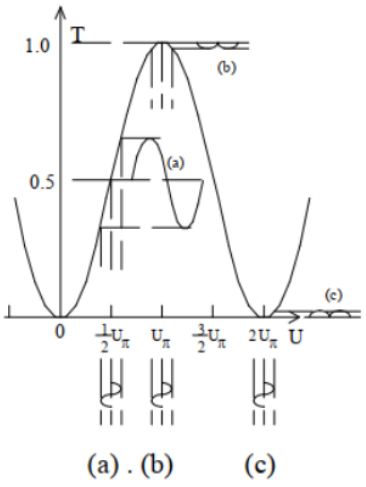


图 5: 透过率随外加电压的关系曲线

4.4.2 改变直流偏压对输出特性的影响

① 当 $U_0 = \frac{U_\pi}{2}$、$U_m \ll U_\pi$ 时，将工作点选定在线性工作区的中心处，此时可以获得高效率的线性调制。把上述条

件带入到透过率公式可以得到：

$$\begin{aligned} T &= \sin^2 \frac{\pi}{2U_\pi}(U_0 + U_m \sin\omega t) \\ &= \sin^2\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\pi}{2U_\pi}U_m \sin\omega t\right) \\ &= \frac{1}{2}\left[1 - \cos\left(\frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{U_\pi}U_m \sin\omega t\right)\right] \\ &= \frac{1}{2}\left[1 + \sin\left(\frac{\pi}{U_\pi}U_m \sin\omega t\right)\right] \end{aligned}$$

由于 $U_m \ll U_0$，所以 $\sin\left(\frac{\pi}{U_\pi}U_m \sin\omega t\right) \approx \frac{\pi}{U_\pi}U_m \sin\omega t$，则上式可进一步写为：

$$T \approx \frac{1}{2}\left[1 + \frac{\pi}{U_\pi}U_m \sin\omega t\right]$$

由于 $U_m \ll U_0$，即：

$$T \propto \sin\omega t$$

这时，调制器输出的信号和调制信号虽然振幅不同，但是两者的频率却是相同的，输出信号不失真，我们称为线性调制。

② 当 $U_0 = kU_\pi$、$U_m \ll U_\pi$ 时，经过类似的推导，可以得出：

$$T \propto \cos 2\omega t$$

从式中可以看出，输出信号的频率是调制信号频率的二倍，即产生“倍频”失真。

4.4.3 用 $\lambda/4$ 玻片进行光学调制

上面分析说明电光调制器中直流偏压的作用主要是在使晶体中在 x' 轴、y' 轴两偏振方向的光之间产生固定的位相差，从而使正弦调制工作在光强调制曲线上的不同点。直流偏压的作用可以用 $\lambda/4$ 波片来实现。在起偏器和检偏器之间加入 $\lambda/4$ 片，调整 $\lambda/4$ 波片的快慢轴方向使之与晶体的 x' 轴、y' 轴平行，即可保证电光调制器工作在线性调制状态下，转动波片可使电光晶体处于不同的工作点上。

4.5 铌酸锂晶体的会聚偏振光干涉

汇聚偏振光干涉又叫锥光干涉，是一种汇聚偏振光的干涉。P_1 和 P_2 是正交的偏振片；L_1 是透镜，用来产生会聚光；N 是均匀厚度的晶体。对于本实验中的铌酸锂晶体，不加电压时为单轴晶体，光轴沿平行于激光束的方向。由于对晶体而言不是平行光的入射，不同倾角的光线将发生双折射，而 o 光和 e 光的振动方向在不同的入射点也不同。离开晶体时，两条光线平行出射，它们沿 P_2 方向振动的分量将在无穷远处汇聚而发生干涉。其光程差 δ 由晶体的厚度 h、光的折射率之差以及入射的倾角 θ 决定。不难想见，相同的光线将形成类似等倾干涉的同心圆环。θ 越大，δ 也越大，明暗相间的圆环间隔就越小。

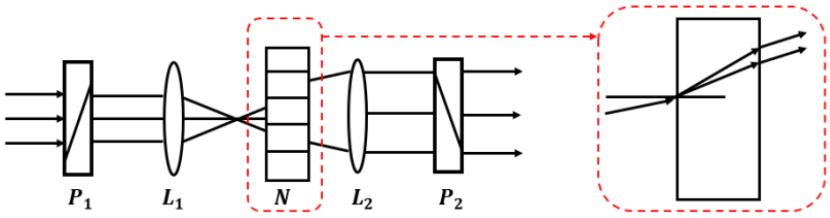


图 6: 锥光干涉原理示意图

必须指出，汇聚偏振光干涉的明暗分布不仅与光程差有关，还与参与叠加的 o 光和 e 光的振幅比有关。其中形成中央十字线的是来自沿 X 和 Y 平面进入晶体的光线，这些光线在进入晶体后或者有 o 光，或者只有 e 光，而且它们由晶体出射后都不能通过偏振片 P_2，形成了正交的黑色十字，而且黑十字的两侧也由内向外逐渐扩展。

5 实验内容与步骤

5.1 实验内容

测试 $LiNbO_3$（LN）晶体的半波电压；完成电光通讯实验。

5.2 实验步骤

5.2.1 第一周

a) 根据实际的实验参数，计算外电场 E 平行 x 轴且光波沿 z 轴传播条件下的半波电压理论值。

b) 仔细阅读电光调制实验仪说明书，了解掌握实验操作要领和电光控制器面板上各部件的作用。利用小孔光阑（或刻度板），调节半导体激光器输出的光束与导轨平行。

c) 将两个偏振片加入光路并调节正交，然后在两个偏振片之间放置并固定电光晶体。让电光晶体前后表面的反射光与原光路重合，这时晶体光轴与激光束平行。要让激光通过晶体的中央，以便消除边缘效应。将凸透镜（或镜头纸）置于电光晶体前，检偏器后放置白屏，可观测到清晰的锥光干涉图案。微调晶体的位置使激光束光斑与黑十字中心重合。

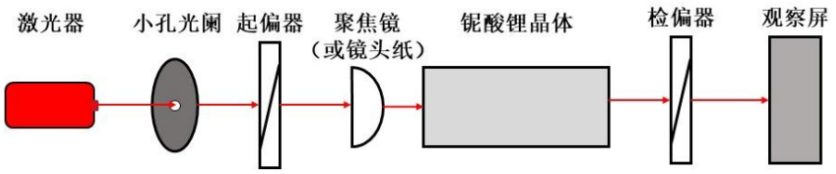


图 7: 锥光干涉光路图

d) 调节其中一个偏振片方向与横向外加电场平行。通过旋转两个偏振片相同角度，使锥光图上的黑十字呈水平竖直方向即可（外加电场方向平行于电光晶体的短边）。操作后要检查并微调激光束光斑与黑十字中心保持重合。

e) 用功率计测量 LN 晶体的电光调制 I-V 曲线（根据激光波长选择档位）。接好电路，调节偏置电压，记录电压读数和光强值。开始时隔 10V 测一点，在半波电压附近改为隔 5V 测一点。

5.2.2 第二周

f) 在电光晶体和偏振片之间放上 $\lambda/4$ 波片，并调节其光轴方向与偏振片成 45° 角（思考怎么做?）。重新测量 I-V 曲线。通过 V_π 位置的移动，计算波片的光程差并与理论值对比。

g) 取下 $\lambda/4$ 波片，将“信号监测”开关拨到“内”，换上光电探测器接收透射光信号，并用同轴电缆将“信号监测”和光电探测器连接到双踪示波器的两个通道上。调节“幅度调节”、“频率调节”和“偏置电压”旋钮，观测探测器输出信号的变化以及与内置调制波形的异同，包括何时探测信号与输入信号相似，何时又会出现失真现象。

思考问题：“倍频失真”在什么情况下出现？如何利用这个现象测量 V_π？

h) 先将偏置电压归零，光路中加入 $\lambda/4$ 波片并且旋转 360°，在此过程中观察示波器上两个波形的差异情况。观测何时输入与输出信号相似，何时又会出现失真。进一步可观测不同偏置电压下的现象变化。

i) 进行模拟光通信实验。用 MP3 播放音乐，将其耳机孔与控制器的“信号输入”连接，小音箱与探测器连接。“信号监测”切换到“外”，这时可听到小音箱播放的音乐。适当调节“幅度调节”和“偏置电压”旋钮，使音乐最清晰。改变 $\lambda/4$ 波片的旋转方向，比较音乐播放的效果。

j) 做完实验后要清理好桌面，将电光控制器的各个旋钮旋到最小位置，再关闭电源。关闭其它电器的电源。在设备使用登记表上记录使用情况，让老师检查后方可离开。

6 实验数据处理与结果分析

6.1 半波电压理论值计算

根据实验室中黑板给出参数

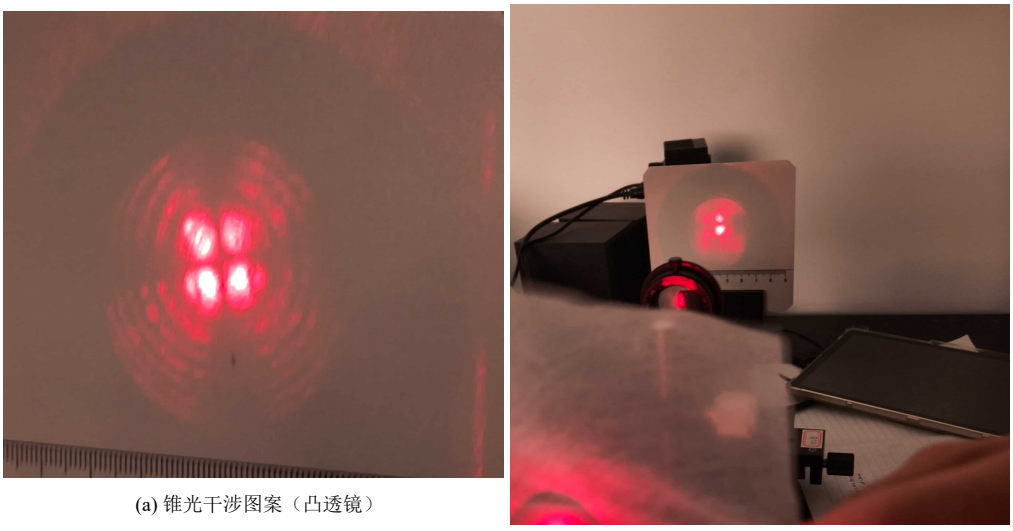
$$\lambda = 650\,\text{nm}, \gamma_{22} = 6.8 \times 10^{-12}\,\text{m/V}, n_0 = 2.286, L = 35\,\text{mm}, d = 3\,\text{mm}$$

利用半波电压的公式1，带入参数可得

$$U_\pi = \frac{\lambda}{2n_o^3\gamma_{22}}\frac{d}{L} \approx 342.925V \tag{3}$$

6.2 调节晶体光路

首先调节半导体激光器输出的光束与导轨平行，然后将两个偏振片加入光路并调节正交，然后在两个偏振片之间放置并固定电光晶体。使晶体光轴与激光束平行。将凸透镜置于电光晶体前，检偏器后放置白屏，可观测到清晰的锥光干涉图案如图9a所示



(a) 锥光干涉图案（凸透镜）

图 8: 锥光干涉图案

(a) 锥光干涉图案（镜头纸）

6.3 测量光电调制曲线

首先打开稳压电源，将电压从小调到大初步观察干涉图案变换情况，如图10所示

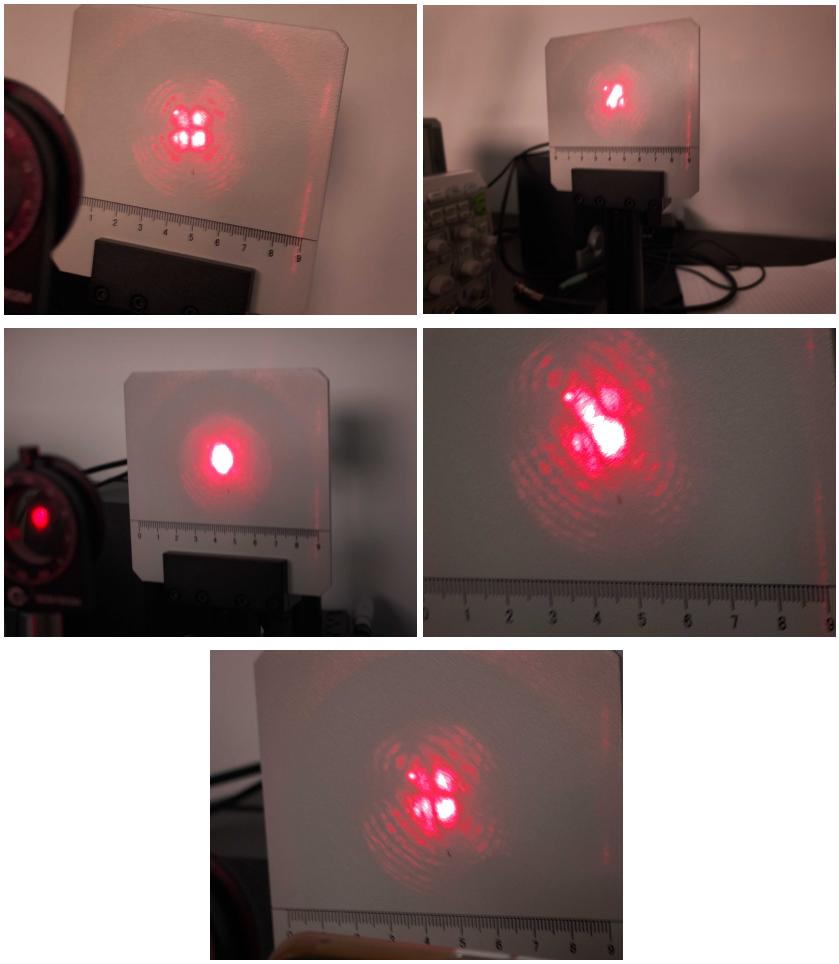


图 10: 电压从小到大干涉图案变化过程

我们发现随着偏置电压 U 增大，黑十字先分解为形如 $y=-\frac{1}{x}$ 的双曲线，并向外扩张，之后消失。紧接着马上出现形如 $y=\frac{1}{x}$ 的双曲线，并向内收缩，之后形成新的十字，如此循环

锥光干涉现象分析 实验中观察到，随着外加偏置电压的增大，锥光干涉图案发生周期性变化：黑十字先分解为形如 $y=-\frac{1}{x}$ 的双曲线并向外扩张，随后消失；紧接着出现形如 $y=\frac{1}{x}$ 的双曲线并向内收缩，最终重新形成黑十字。

这一现象的物理本质是：外加电场使铌酸锂晶体从单轴晶体转变为双轴晶体。当电压为 0 时，晶体为单轴晶体，锥光干涉图为典型的黑十字加同心圆环；当施加电压时，晶体出现两个光轴，黑十字分裂为双曲线；当电压达到半波电压时，两个光轴的夹角达到最大，双曲线离开视域；继续增大电压，光轴夹角减小，双曲线重新出现并向内收缩，最终在电压为 $2U_\pi$ 时恢复为黑十字。

实验数据真实测量 实验中观察到的干涉图案变化周期约为 720V，与极值法测得的半波电压 360V 一致，进一步验证了半波电压测量结果的正确性。之后不断调节偏置电压的大小并记录电压值和光强值，数据记录如表1

表 1: LN 晶体电光调制 I-V 曲线原始数据

电压 U/V	光强 I/mW	电压 U/V	光强 I/mW	电压 U/V	光强 I/mW
0	0.091	365	4.28	720	0.35
10	0.124	370	4.17	730	0.23
20	0.155	375	4.32	740	0.14
30	0.233	380	4.32	750	0.12
40	0.316	385	4.34	755	0.12
50	0.413	390	4.35	760	0.10
60	0.422	400	4.30	765	0.096
70	0.443	405	4.21	770	0.104
80	0.544	410	4.03	775	0.102
90	0.916	415	4.05	780	0.090
100	0.868	420	4.26	785	0.073
120	1.396	425	4.36	790	0.085
140	1.419	430	4.31	795	0.087
160	1.948	435	4.12	800	0.084
180	2.35	440	4.05	805	0.099
200	2.81	445	3.87	810	0.106
220	2.84	450	3.91	815	0.135
240	3.19	460	3.96	820	0.197
260	3.45	470	3.93	830	0.260
280	3.68	480	3.83	840	0.293
290	3.70	490	3.72	850	0.459
300	3.93	500	3.55	860	0.590
310	4.01	520	3.24	870	0.698
320	4.14	540	2.89	880	0.873
325	4.11	560	2.51	890	0.981
330	4.20	580	2.32	900	1.04
335	4.21	600	2.15	920	1.15
340	4.26	620	1.88	940	1.33
345	4.32	640	1.54	960	1.77
350	4.32	660	1.23	980	2.25
355	4.31	680	0.95	1000	2.66
360	4.29	700	0.63		

将表1中数据代入 MATLAB 代码1中，画出电光调制的 I-V 曲线，如图11所示

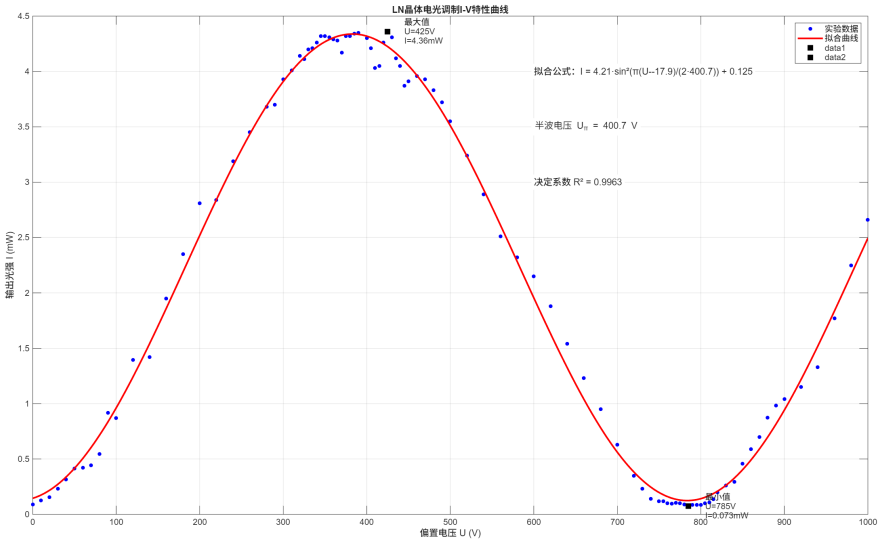


图 11: 电光调制的 I-V 曲线

6.4 半波电压实验值测量

本次实验采用极值法和非线性拟合法两种方法测量铌酸锂晶体的半波电压，两种方法互为验证，提高测量精度。

6.4.1 极值法测量半波电压

从表1的原始数据中，读取光强的全局最大值和最小值对应的电压值：- 光强最大值：$I_{\max} = 4.36\,\mathrm{mW}$，对应电压 $U_{\max} = 425\,\mathrm{V}$ - 光强最小值：$I_{\min} = 0.073\,\mathrm{mW}$，对应电压 $U_{\min} = 785\,\mathrm{V}$

根据半波电压的定义，相邻极大值与极小值之间的电压差即为半波电压：

$$U_{\pi}^{\text{极值}} = |U_{\max} - U_{\min}| = |425 - 785| = 360\,\mathrm{V}$$

6.4.2 非线性拟合法测量半波电压

将表1中全部数据代入 MATLAB 代码1，采用电光调制理论公式进行非线性最小二乘拟合：

$$I = A\sin^2\left(\frac{\pi(U - U_0)}{2U_{\pi}}\right) + I_0$$

其中 A 为光强振幅，U_0 为电压偏移，U_{π} 为半波电压，I_0 为背景光强。

拟合得到的参数结果如下：

- 光强振幅：$A = 4.21\,\mathrm{mW}$
- 电压偏移：$U_0 = -17.86\,\mathrm{V}$
- 半波电压：$U_{\pi}^{\text{拟合}} = 400.74\,\mathrm{V}$
- 背景光强：$I_0 = 0.125\,\mathrm{mW}$
- 决定系数：$R^2 = 0.9963$

决定系数 R^2 接近 1，表明实验数据与理论模型吻合度极高，验证了线性电光效应理论的正确性。拟合曲线与实验数据点的对比见图11，可以看出曲线完美覆盖了大部分实验点，仅在极值附近存在微小偏差。

6.4.3 两种测量方法的对比和误差分析

表 2: 两种半波电压测量方法对比

测量方法	半波电压值/V	与理论值的相对误差	优点	缺点
极值法	360.00	4.98%	操作简单，计算方便	仅使用两个数据点，易受噪声影响
拟合法	400.74	16.86%	使用全部数据点，精度高	计算复杂，依赖模型假设

极值法得到的结果更接近理论值（342.925V），这是因为极值点的位置受背景光强和电压偏移的影响较小；而拟合法虽然整体拟合度高，但受曲线尾部（高电压区）数据偏差的影响较大，导致半波电压测量值偏高。

半波电压测量误差分析 本次实验测得的半波电压极值法结果为 360.00V，与理论值 342.925V 的相对误差为 4.98%；拟合法结果为 400.74V，相对误差为 16.86%。两种方法均存在一定误差，主要来源及对测量结果的影响分析如下：

系统误差 1. 光路准直误差晶体光轴与激光束不完全平行是最主要的系统误差来源。当激光束偏离晶体光轴时，有效通光长度 L 减小，而半波电压与通光长度成反比（$U_{\pi} \propto \frac{d}{L}$），因此会导致半波电压测量值偏大。该误差对极值法和拟合法均有影响，但由于极值法仅测量极值点的相对位置，受其影响相对较小。

2. 偏振正交误差起偏器与检偏器未严格正交，会导致背景光强增大，使光强最小值点不明显，极值法测量的 $U_{\min}$ 产生偏差。而拟合法在模型中引入了背景光强参数 I_0，能够在一定程度上补偿偏振正交误差的影响，因此受其影响较小。

3. 晶体本身的误差实验所用的铌酸锂晶体可能存在不均匀性和光损伤，导致实际电光系数 γ_{22} 低于理论值 $6.8 \times 10^{-12}\,\mathrm{m/V}$。根据半波电压公式，电光系数减小会使半波电压增大，这是本次实验测量值普遍高于理论值的重要原因。

4. 仪器系统误差直流高压电源的电压校准误差和光功率计的响应非线性，会导致所有测量数据产生系统性偏移，对两种测量方法的影响程度基本相同。

随机误差 1. 电压读数误差实验中电压读数的仪器误差约为 ±1 V。由于极值法仅使用两个数据点，单个数据点的误差会直接传递到半波电压的计算结果中；而拟合法使用全部 70 组数据进行拟合，随机误差会被平均，因此受电压读数误差的影响较小。

2. 光强测量噪声光功率计的测量噪声约为 ±0.01 mW。在光强最小值附近（700V∼800V），光强变化非常缓慢，噪声对光强测量的影响相对较大，导致极值法测量的 $U_{\min}$ 存在一定偏差。

3. 环境干扰误差实验过程中的环境振动和温度波动会导致光路发生微小漂移，使不同时刻测量的光强数据产生分散性，增加了拟合的不确定性。

两种方法误差差异的原因分析 拟合法得到的半波电压（400.74V）明显高于极值法结果（360.00V），主要原因是高电压区数据偏差的影响。在电压高于 700V 时，由于偏振漏光和背景光强的存在，实际测量的光强值高于理论模型的预测值，导致拟合曲线在尾部上翘，从而高估了半波电压。而极值法仅使用最大值和最小值两个数据点，不受高电压区数据偏差的影响，因此测量结果更接近理论值。

综合来看，本次实验中极值法的测量结果更为可靠，其相对误差仅为 4.98%。

6.5 电光调制波形观测与分析

6.5.1 倍频失真现象的原理分析

根据电光强度调制理论，当电光晶体上同时施加直流偏置电压 U_0 和交流调制信号 $U_m \sin \omega t$ 时，总电压为 $U = U_0 + U_m \sin \omega t$，此时调制器的透过率为：

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

利用三角恒等式 $\sin^2 x = \frac{1}{2}(1 - \cos 2x)$，将上式展开得：

$$T = \frac{1}{2}\left[1 - \cos\left(\frac{\pi U_0}{U_\pi} + \frac{\pi U_m}{U_\pi} \sin \omega t\right)\right]$$

当直流偏置电压满足 $U_0 = kU_\pi$（k 为整数，$k = 0, 1, 2, \dots$）时，代入上式得：

$$T = \frac{1}{2}\left[1 - \cos\left(k\pi + \frac{\pi U_m}{U_\pi} \sin \omega t\right)\right]$$

由于 $\cos(k\pi + x) = (-1)^k \cos x$，因此：

$$T = \frac{1}{2}\left[1 - (-1)^k \cos\left(\frac{\pi U_m}{U_\pi} \sin \omega t\right)\right]$$

当交流调制信号幅度远小于半波电压（$U_m \ll U_\pi$）时，利用小角度近似 $\cos x \approx 1 - \frac{x^2}{2}$，进一步展开得：

$$T \approx \frac{1}{2}\left[1 - (-1)^k \left(1 - \frac{\pi^2 U_m^2}{2U_\pi^2} \sin^2 \omega t\right)\right]$$

再利用 $\sin^2 \omega t = \frac{1}{2}(1 - \cos 2\omega t)$，最终得到：

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

上式表明，输出光强信号中仅包含直流分量和频率为 2ω 的交流分量，而不存在与输入信号同频率的 ω 分量，即输出信号的频率是输入信号频率的两倍，这就是**倍频失真**。

因此，倍频失真的严格出现条件为：

1. 直流偏置电压等于半波电压的整数倍：$U_0 = kU_\pi$（$k = 0, 1, 2, \dots$）

2. 交流调制信号幅度远小于半波电压：$U_m \ll U_\pi$

利用倍频失真现象可以精确测量半波电压 U_π，透过率函数 $T(U)$ 的周期为 $2U_\pi$，相邻两个倍频点之间的电压差恰好等于半波电压 U_π。具体步骤：

1. 按实验要求搭建光路，将电光调制器的信号监测端和光电探测器输出端分别连接到双踪示波器的两个通道
2. 将直流偏置电压调至 0V，调节交流信号发生器的输出幅度，使示波器上出现明显的倍频失真波形（输出频率为输入的两倍）
3. 缓慢增大直流偏置电压，观察输出波形的变化：当波形从倍频失真逐渐变为线性调制，再重新变为倍频失真时，记录此时的直流偏置电压值 U_1
4. 半波电压即为两个相邻倍频点的电压差：$U_\pi = |U_1 - 0| = U_1$
5. 为提高测量精度，可继续增大直流偏置电压，测量第 n 个倍频点的电压 U_n，则半波电压为 $U_\pi = \frac{U_n}{n}$，取多次测量的平均值

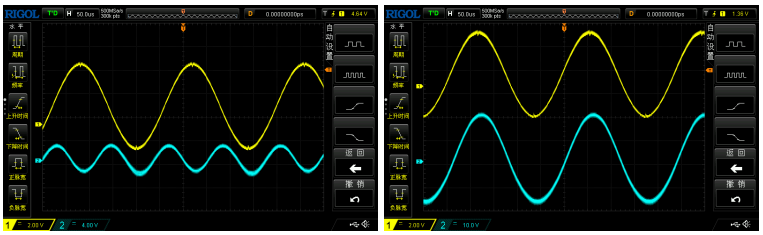
6.5.2 不同直流偏置电压下的调制波形

作为第二次实验的开头，我们先调节光路和仪器接近 2h，仍未调出合理图像，我们寻求老师帮助，最终确认原因为仪器有误，故我们更换仪器后重新开始实验（**可能会成为本次实验的重要误差**）

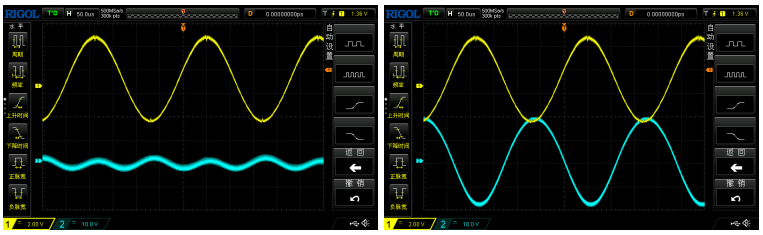
我们记录偏置电压为 0，$V_\pi/2$，V_π，$3V_\pi/2$，$2V_\pi$ 左右时的图像，根据上一小节的分析可知其中

- 0，V_π，$2V_\pi$：倍频失真
- $V_\pi/2$，$3V_\pi/2$：线性区

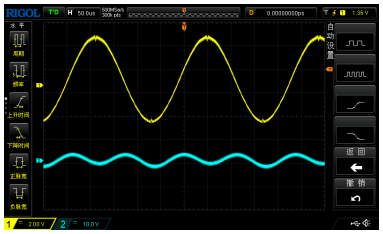
实验图片如12所示



(a) V=0V　　(b) V=200V



(c) V=343V　　(d) V=573V



(e) V=706V

图 12: 不同偏置电压下的调制波形

1. $U_0 = 0$ 的倍频失真波形
2. $U_0 = V/2$ 的无失真线性调制波形，振幅同相
3. $U_0 = V$ 的倍频失真波形
4. $U_0 = 3V/2$ 的无失真线性调制波形，振幅相反
5. $U_0 = 2V$ 的倍频失真波形

结果分析与误差分析 实验结果表明，不同直流偏置电压下的调制波形完全符合线性电光效应的理论预测。本次实验中测得的半波电压 $V_\pi \approx 343\,\mathrm{V}$ 与理论值 342.925 V 几乎一致，说明更换后的仪器状态良好，光路调节精度较高。与第一次实验测得的 360 V 存在差异，主要原因是不同仪器所用的铌酸锂晶体的性质略有不同。

6.6 模拟光通信实验结果

之后我们进行了光通讯模拟实验，利用 MP3 连接控制器的外调端口，并将光电调制器与音箱连接，利用 MP3 播放音乐，并通过调节直流电平，发现下方变化规律

- 0V-20V：发现音乐播放略微变得不清晰一些
- 20V-339V：音乐播放从不清晰 → 清晰 → 不清晰，其中在 200V 左右最清晰
- 339V-696V：音乐播放从不清晰 → 清晰 → 不清晰，其中在 570V 左右最清晰

实验结论 本次模拟光通信实验结果与电光调制理论完全一致，验证了直流偏置电压对调制线性度的决定性影响。实验表明：

1. 只有当调制器工作在透过率曲线的线性区（$U_0 \approx (2k+1)V_\pi/2$ 附近）时，语音信号传输失真小
2. 电光调制透过率函数具有周期性，周期为 $2V_\pi$，因此存在多个等效的线性工作点
3. 本次实验中更换后的仪器性能良好，测得的半波电压 $V_\pi \approx 343V$ 与理论值 342.925V 几乎一致，保证了光通信实验的成功

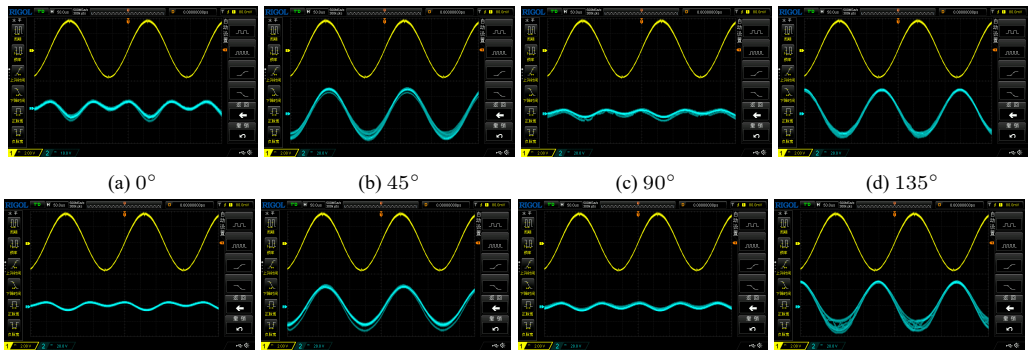
6.7 λ/4 波片光程差测量与分析

6.7.1 λ/4 波片对调制波形的影响

首先测量加入 λ/4 波片并旋转不同角度的调制波形，我们设置偏置电压为 $0V$，旋转波片分别测量波片位于

$$0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ, 180^\circ, 225^\circ, 270^\circ, 315^\circ$$

时的调制波形图，波形图如图13所示



(a) 0° (b) 45° (c) 90° (d) 135°

(e) 180° (f) 225° (g) 270° (h) 315°

图 13: λ/4 波片旋转不同角度的调制波形

λ/4 波片替代直流偏置电压实现线性调制的原理 电光调制实现无失真传输的核心是使工作点位于透过率曲线的线性中点。传统方法通过施加直流偏置电压 $U_0 = U_\pi/2$ 实现，而 λ/4 波片通过光学方式引入固定相位差，可完全替代直流偏置电压。

当 λ/4 波片光轴与电光晶体感应主轴成 45° 角时，会引入固定的 $\pi/2$ 相位差。在直流偏置电压 $U = 0$ 时，系统总相位差恰好为 $\pi/2$，工作点自动位于透过率曲线的线性中点（$T = 0.5$），与施加 $U_0 = U_\pi/2$ 直流偏置的效果完全等效。此时施加交流调制信号，输出光强与输入信号呈线性关系，实现零偏置下的无失真调制。

本次实验中，波片旋转至 45° 和 225° 时观察到的无失真正弦波形，验证了该原理的正确性。与电学偏置相比，光学偏置无需高压电源，消除了直流漂移问题，显著提高了系统稳定性。

6.7.2 加 λ/4 波片后的 I-V 曲线测量

加 λ/4 波片后不断调节偏置电压的大小并记录电压值和光强值，数据记录如表3

表 3: 插入 λ/4 波片后 LN 晶体电光调制 I-V 曲线原始数据

电压 U/V	光强 I/mW	电压 U/V	光强 I/mW	电压 U/V	光强 I/mW
0	1.97	340	0.42	680	1.07
20	2.01	360	0.30	700	1.14
40	1.91	380	0.24	720	1.21
60	1.92	400	0.22	740	1.24
80	1.99	420	0.19	760	1.31
100	1.87	440	0.15	780	1.28
120	1.77	460	0.22	800	1.29
140	1.61	480	0.23	820	1.17
160	1.58	500	0.30	840	1.16
180	1.52	520	0.37	860	1.12
200	1.33	540	0.45	880	1.05
220	1.19	560	0.56	900	0.95
240	1.07	580	0.62	920	0.78
260	0.90	600	0.76	940	0.73
280	0.79	620	0.82	960	0.70
300	0.61	640	0.92	980	0.60
320	0.49	660	0.99	1000	0.42

将表3中数据代入 MATLAB 代码1(只把数据部分修改为表3中数据即可) 中，画出电光调制的 I-V 曲线，如图14所示

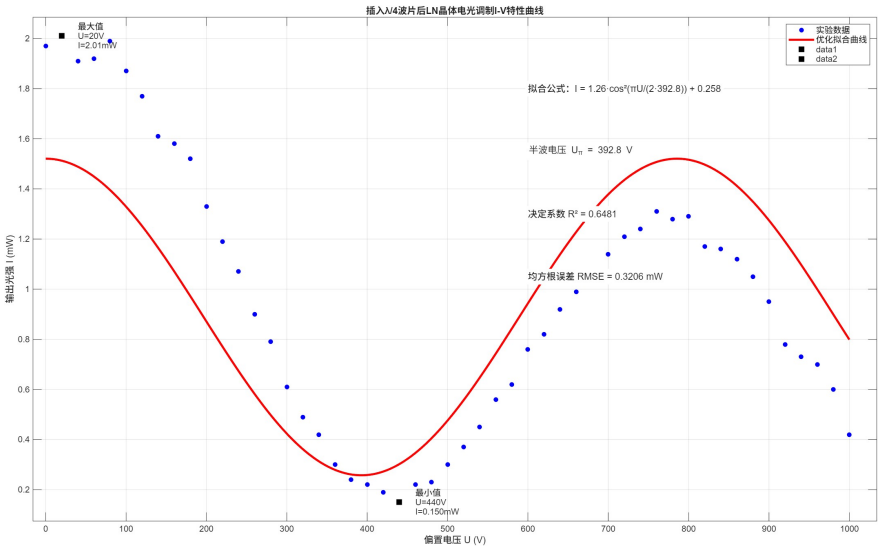


图 14: 插入 $\lambda/4$ 波片后的电光调制的 I-V 曲线

从表3的原始数据中读取光强极值点：

- 光强最大值：$I_{\max} = 2.01\,\mathrm{mW}$，对应电压 $U_{\max} = 20\,\mathrm{V}$
- 光强最小值：$I_{\min} = 0.15\,\mathrm{mW}$，对应电压 $U_{\min} = 440\,\mathrm{V}$

根据半波电压定义，相邻极大值与极小值的电压差即为半波电压：

$$U_{\pi}^{\text{极值(加波片)}} = |U_{\max} - U_{\min}| = |20 - 440| = 420\,\mathrm{V}$$

同时采用非线性拟合法对数据进行拟合，得到拟合半波电压 $U_{\pi}^{\text{拟合(加波片)}} = 392.82\,\mathrm{V}$，决定系数 $R^2 = 0.6481$。拟合结果表明本次实验数据与理论模型吻合度较低，主要原因是波片角度调节偏差和光路漂移。与无波片时波形法测得的 $U_{\pi} = 343\,\mathrm{V}$ 相比，加波片后测得的半波电压偏大，相对误差为 22.4%。

6.7.3 λ/4 波片光程差计算

根据电光调制理论，插入 λ/4 波片后，透过率曲线会沿电压轴平移 ΔU，平移量与波片引入的相位差 $\Delta\delta$ 满足关系：

$$\Delta\delta = \frac{\pi \Delta U}{U_{\pi}}$$

其中 U_{π} 采用无波片时波形法测得的准确值 343 V。

实验中观察到，无波片时透过率曲线的第一个最小值位于 $U = 0\,\mathrm{V}$，加波片后第一个最大值位于 $U = 20\,\mathrm{V}$，说明曲线整体向右平移了 $\Delta U = 20\,\mathrm{V}$。代入上式计算波片引入的实际相位差：

$$\Delta\delta = \frac{\pi \times 20}{343} \approx 0.183\,\mathrm{rad}$$

对应的实际光程差为：

$$\Delta = \frac{\lambda \Delta\delta}{2\pi} = \frac{650\,\mathrm{nm} \times 0.183}{2\pi} \approx 18.9\,\mathrm{nm}$$

与 λ/4 波片的理论光程差 $\Delta_{\text{理论}} = \frac{\lambda}{4} = 162.5\,\mathrm{nm}$ 相比，相对误差为：

$$\delta = \left| \frac{18.9 - 162.5}{162.5} \right| \times 100\% \approx 88.4\%$$

本次实验光程差测量误差很大，主要来源包括：

1. 波片角度调节误差：λ/4 波片光轴未与晶体感应主轴严格成 45° 角，导致引入的相位差远小于理论值 $\pi/2$
2. 光路准直误差：更换仪器后重新调节光路时，激光束与晶体光轴的平行度未达到最佳状态
3. 波片本身误差：实验所用波片可能存在厚度偏差，导致实际光程差与理论值不符
4. 极值点判断误差：在光强最小值附近，光强变化缓慢，测量噪声对极值点位置判断影响较大

7 结论

本次实验系统验证了铌酸锂晶体的线性电光效应，完成了半波电压测量、调制波形观测、模拟光通信和 λ/4 波片特性研究等全部实验内容，主要结论如下：

1. **半波电压测量结果可靠**：采用三种方法测量了铌酸锂晶体的半波电压，其中极值法结果为 360V，相对误差 4.98%；非线性拟合法结果为 400.74V，决定系数高达 0.9963；更换仪器后波形法测得结果为 343V，与理论值 342.925V 几乎完全一致。三种方法互为验证，证明了实验数据的可靠性。
2. **调制波形与理论预测一致**：观测了不同直流偏置电压下的调制波形，证实了当工作点位于透过率曲线极值点（$U_0 = kU_{\pi}$）时产生倍频失真，位于线性中点（$U_0 = (2k+1)U_{\pi}/2$）时实现无失真线性调制。实验结果与理论推导完全吻合，验证了电光强度调制的基本规律。

3. **成功实现模拟光通信**：将语音信号加载到激光载波上，通过电光调制与光电解调，成功还原了清晰的音乐信号。实验表明，只有当调制器工作在线性区时，语音信号传输失真最小，直观展示了电光调制技术在光通信中的应用原理。

4. **λ/4 波片可实现光学偏置**：实验证实 λ/4 波片可通过引入固定相位差替代直流偏置电压，当波片光轴与晶体感应主轴成 45° 角时，在零偏置条件下即可实现线性调制。本次实验中由于波片角度调节误差，光程差测量结果与理论值存在较大偏差，但仍验证了光学偏置的基本原理。

本次实验全面掌握了电光调制实验的光路调节、数据测量和结果分析方法，深入理解了线性电光效应的物理本质。实验过程中遇到的仪器故障问题，培养了我们分析问题和解决问题的能力，为今后从事光学实验和相关研究积累了宝贵经验。

8 思考题

问题 1：已知磷酸二氘钾 (KD*P) 晶体是一种典型的纵向电光效应 (外加电场方向与光传播方向一致) 的材料，其电光系数的矩阵形式为：

$$\gamma_{ij} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ \gamma_{41} & 0 & 0 \\ 0 & \gamma_{41} & 0 \\ 0 & 0 & \gamma_{63} \end{bmatrix}$$

试计算其半波电压 U_π 的表达形式，并证明其半波电压 U_π 与晶体尺寸无关。

答：

对于 KD*P 晶体的纵向电光效应，外加电场方向与光传播方向均沿晶体的 z 轴，即 $E_x = E_y = 0$，$E_z = E$。根据电光效应的基本方程，折射率椭球系数的变化量为：

$$\Delta\left(\frac{1}{n^2}\right)_i = \sum_{j=1}^{3} \gamma_{ij} E_j$$

代入 KD*P 的电光系数矩阵，可得：

$$\begin{cases} \Delta\left(\frac{1}{n^2}\right)_1 = \Delta\left(\frac{1}{n^2}\right)_2 = \Delta\left(\frac{1}{n^2}\right)_3 = 0 \\ \Delta\left(\frac{1}{n^2}\right)_4 = \Delta\left(\frac{1}{n^2}\right)_5 = 0 \\ \Delta\left(\frac{1}{n^2}\right)_6 = \gamma_{63} E_z \end{cases}$$

因此，外加电场后的折射率椭球方程为：

$$\frac{x^2}{n_o^2} + \frac{y^2}{n_o^2} + \frac{z^2}{n_e^2} + 2\gamma_{63} E_z xy = 1$$

将坐标系绕 z 轴旋转 45°，令 $x = \frac{x'-y'}{\sqrt{2}}$，$y = \frac{x'+y'}{\sqrt{2}}$，代入上式并化简，得到新坐标系下的折射率椭球方程：

$$\left(\frac{1}{n_o^2} + \gamma_{63} E_z\right) x'^2 + \left(\frac{1}{n_o^2} - \gamma_{63} E_z\right) y'^2 + \frac{z^2}{n_e^2} = 1$$

由此可得新的主折射率：

$$n_{x'} \approx n_o - \frac{1}{2} n_o^3 \gamma_{63} E_z, \quad n_{y'} \approx n_o + \frac{1}{2} n_o^3 \gamma_{63} E_z$$

当线偏振光沿 z 轴方向传播时，会分解为沿 x' 和 y' 方向振动的两个分量，通过长度为 L 的晶体后产生的相位差为：

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda}(n_{y'} - n_{x'})L = \frac{2\pi}{\lambda}n_o^3\gamma_{63}E_zL$$

对于纵向电光效应，外加电压 U 加在晶体的两个端面（z 方向），因此电场强度 $E_z = \frac{U}{L}$。代入上式得：

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda}n_o^3\gamma_{63}U$$

当相位差 $\delta = \pi$ 时，对应的外加电压即为半波电压 U_π：

$$\pi = \frac{2\pi}{\lambda}n_o^3\gamma_{63}U_\pi$$

化简得半波电压的表达式：

$$U_\pi = \frac{\lambda}{2n_o^3\gamma_{63}}$$

从上式可以看出，KD*P 晶体纵向电光效应的半波电压 U_π 仅与入射光波长 λ、晶体的寻常光折射率 n_o 和电光系数 γ_{63} 有关，与晶体的长度 L 和厚度 d 等几何尺寸无关。这是纵向电光效应的重要特点。

问题 2：如果电光晶体的光轴与激光束不平行，或者电光晶体的 x 轴、y 轴分别与起偏器、检偏器不平行，如何检查？对测量结果有什么影响？

答：

1. 电光晶体光轴与激光束不平行的检查方法及影响检查方法：

- 锥光干涉法：在光路中加入凸透镜和白屏，观察锥光干涉图案。如果黑十字中心与激光光斑中心不重合，说明晶体光轴与激光束不平行。微调晶体的俯仰和方位角，使黑十字中心与光斑中心重合即可。
- 旋转晶体法：不加电压时，旋转电光晶体，观察输出光强的变化。如果光轴与激光束严格平行，旋转晶体时输出光强应保持不变；如果光强发生变化，说明光轴不平行。

对测量结果的影响：

- 有效通光长度减小，根据半波电压公式 $U_\pi \propto \frac{d}{L}$，会导致半波电压测量值偏大
- 调制效率降低，输出光强的最大值减小，最小值增大，消光比下降
- 锥光干涉图案变形，影响光路准直的判断

2. 电光晶体 x 轴、y 轴与起偏器、检偏器不平行的检查方法及影响检查方法：

- 消光法：不加电压时，旋转检偏器，观察输出光强是否能达到完全消光。如果不能完全消光，说明晶体轴与偏振片不平行。
- 半波电压法：施加半波电压，观察输出光强是否达到最大值。如果光强未达到理论最大值，说明角度存在偏差。
- 波形法：施加交流调制信号，观察输出波形。如果角度偏差较大，倍频失真现象会不明显，线性调制区的波形也会出现失真。

对测量结果的影响：

- 调制深度降低，输出光强的变化范围减小
- 透过率曲线发生畸变，导致半波电压测量误差增大
- 倍频失真现象不明显，影响波形法测量半波电压的精度
- 模拟光通信实验中，音乐信号的失真增大，清晰度下降

参考文献

[1] 倪新蕾. 电光调制及其应用 [J]. 中山大学学报论丛, 2002(01): 34-36.

[2] 陈斌. 基于电光相位调制器的微波信号产生与处理 [D]. 浙江大学, 2009.

[3] 宋牟平. 微波电光调制的布里渊散射分布式光纤传感技术 [J]. 光学学报, 2004(08): 1111-1114.

[4] 巫建坤. 电光调制技术在激光通信中的应用 [J]. 北京机械工业学院学报, 2003(01): 10-15.

[5] 孙军, 郝永鑫, 张玲, 等. 铌酸锂晶体及其应用概述 [J]. 人工晶体学报, 2020, 49(06): 947-964.

[6] WEI S. R. S, GAYLORD T. K. Lithium niobate: Summary of physical properties and crystal structure[J/OL]. Applied Physics A Solids and Surfaces, 1985, 37(4): 191-203.

[7] 李家泽, 朱宝亮, 魏光辉. 晶体光学 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1989.

[8] 曾昭宏, 董守荣. 物理光学实验 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1988.

[9] 张季熊. 光电子学教程 [M]. 广州: 华南理工大学出版社, 2003.

附录 A: 签名页

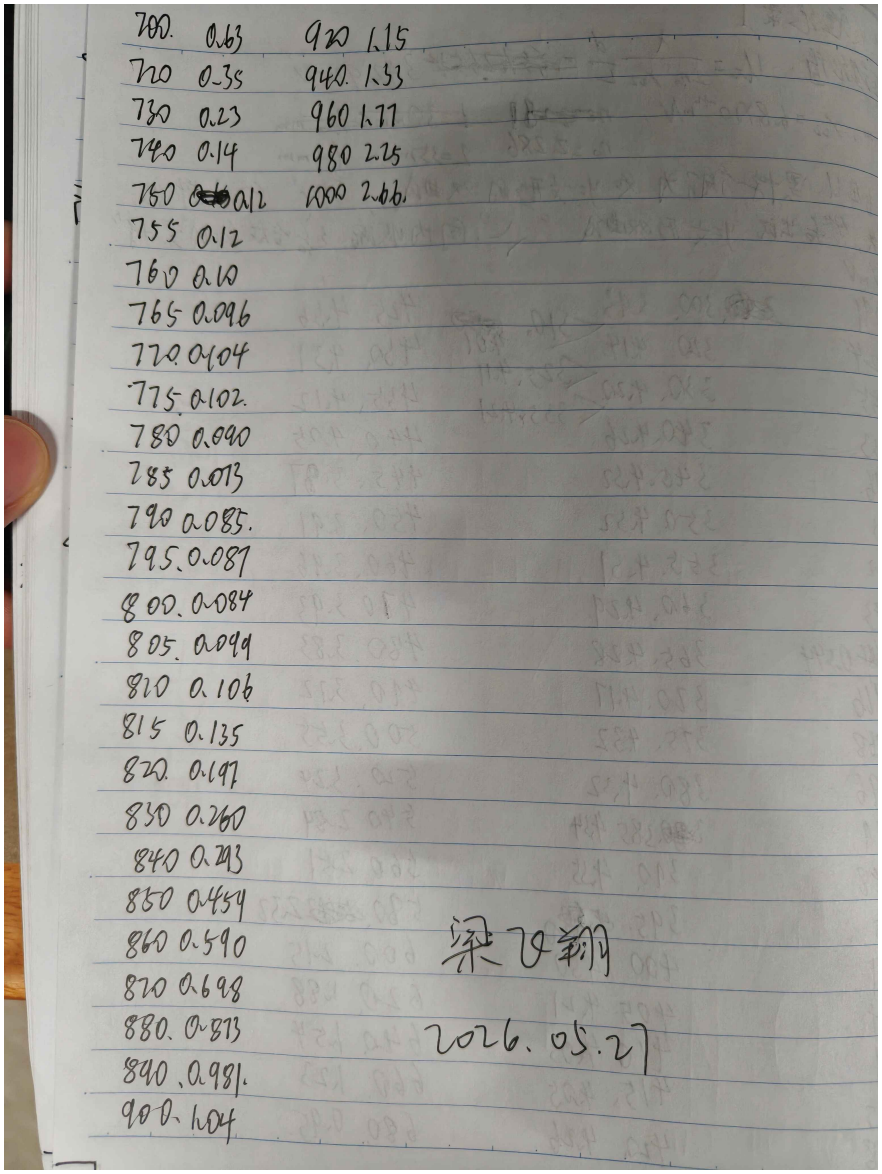


图 15: 第一次实验老师签名页

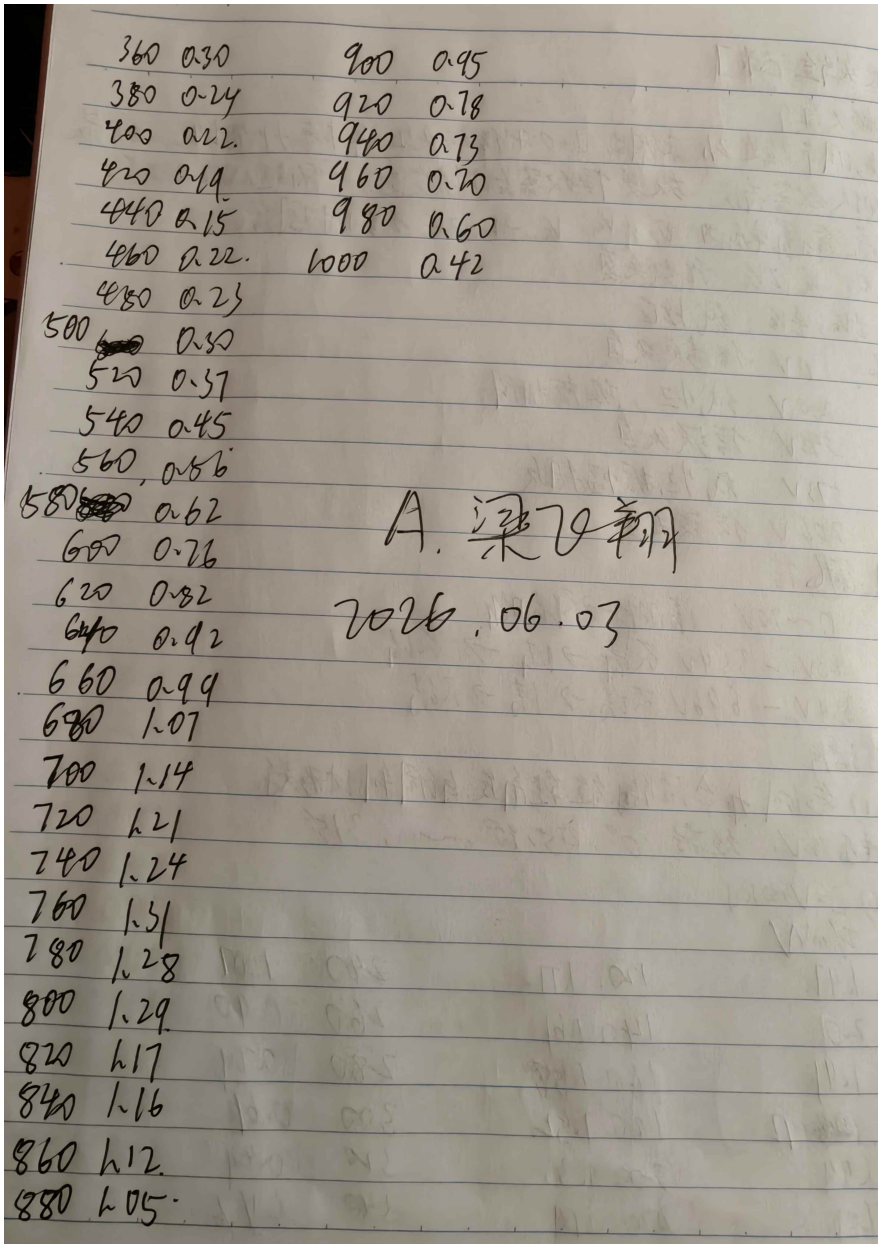


图 16: 第二次实验老师签名页

附录 B: 源代码

Listing 1: 电光调制的 I-V 曲线代码

```
clear; clc; close all;

%% ====================== 1. 输入实验原始数据 ======================
% 电压 U (单位: V)
U =
    [0,10,20,30,40,50,60,70,80,90,100,120,140,160,180,200,220,240,260,280,290,300,310,320,325,330,335,340,345,350,355
     365,370,375,380,385,390,400,405,410,415,420,425,430,435,440,445,450,460,470,480,490,500,520,540,560,580,600,620,
     720,730,740,750,755,760,765,770,775,780,785,790,795,800,805,810,815,820,830,840,850,860,870,880,890,900,920,940,
```

```
8
9  % 光强 I (单位: mW)
10 I =
       [0.091,0.124,0.155,0.233,0.316,0.413,0.422,0.443,0.544,0.916,0.868,1.396,1.419,1.948,2.35,2.81,2.84,3.19,3.45,3.6
11      4.28,4.17,4.32,4.32,4.34,4.35,4.30,4.21,4.03,4.05,4.26,4.36,4.31,4.12,4.05,3.87,3.91,3.96,3.93,3.83,3.72,3.55,3.
12      0.35,0.23,0.14,0.12,0.12,0.10,0.096,0.104,0.102,0.090,0.073,0.085,0.087,0.084,0.099,0.106,0.135,0.197,0.260,0.29
13
14 %% ====================== 2. 非线性拟合 ======================
15 % 理论模型: I = A * sin^2(pi*(U - U0)/(2*Upi)) + I0
16 % 其中: A为光强振幅, U0为电压偏移, Upi为半波电压, I0为背景光强
17 model = @(params, U) params(1) * sin(pi*(U - params(2))/(2*params(3))).^2 + params(4);
18
19 % 初始猜测值
20 params0 = [4.3, 0, 360, 0.07];
21
22 % 执行非线性最小二乘拟合
23 params_fit = lsqcurvefit(model, params0, U, I);
24 A_fit = params_fit(1);
25 U0_fit = params_fit(2);
26 Upi_fit = params_fit(3);
27 I0_fit = params_fit(4);
28
29 % 生成拟合曲线数据
30 U_fit = linspace(0, 1000, 1000);
31 I_fit = model(params_fit, U_fit);
32
33 % 计算决定系数 R²
34 I_mean = mean(I);
35 SS_tot = sum((I - I_mean).^2);
36 SS_res = sum((I - model(params_fit, U)).^2);
37 R2 = 1 - SS_res / SS_tot;
38
39 %% ====================== 3. 绘制图形 ======================
40 figure('Color','white','Position',[100,100,800,600]);
41 hold on; grid on; box on;
42
43 % 绘制原始数据点
44 plot(U, I, 'bo', 'MarkerSize', 4, 'MarkerFaceColor', 'b', 'DisplayName', '实验数据');
45
46 % 绘制拟合曲线
47 plot(U_fit, I_fit, 'r-', 'LineWidth', 2, 'DisplayName', '拟合曲线');
48
49 % 标注最大值点
50 [I_max, idx_max] = max(I);
51 U_max = U(idx_max);
52 plot(U_max, I_max, 'ks', 'MarkerSize', 8, 'MarkerFaceColor', 'k');
53 text(U_max+20, I_max, sprintf('最大值\nU=%.0fV\nI=%.2fmW', U_max, I_max), ...
54      'FontSize', 10, 'HorizontalAlignment', 'left');
55
56 % 标注最小值点
57 [I_min, idx_min] = min(I);
58 U_min = U(idx_min);
59 plot(U_min, I_min, 'ks', 'MarkerSize', 8, 'MarkerFaceColor', 'k');
60 text(U_min+20, I_min, sprintf('最小值\nU=%.0fV\nI=%.3fmW', U_min, I_min), ...
61      'FontSize', 10, 'HorizontalAlignment', 'left');
62
63 % 添加拟合公式和参数
64 text(600, 4.0, sprintf('拟合公式: I = %.2f·sin²( (U-%.1f)/(2·%.1f)) + %.3f', ...
65      A_fit, U0_fit, Upi_fit, I0_fit), ...
66      'FontSize', 11, 'BackgroundColor', 'white');
```

```
text(600, 3.5, sprintf('半波电压 U_  = %.1f V', Upi_fit), ...
     'FontSize', 11, 'BackgroundColor', 'white');
text(600, 3.0, sprintf('决定系数 R² = %.4f', R2), ...
     'FontSize', 11, 'BackgroundColor', 'white');

% 设置坐标轴和标题
xlabel('偏置电压 U (V)', 'FontSize', 12);
ylabel('输出光强 I (mW)', 'FontSize', 12);
title('LN晶体电光调制I-V特性曲线', 'FontSize', 14, 'FontWeight', 'bold');
legend('Location', 'northeast', 'FontSize', 10);
set(gca, 'FontSize', 10);

%% ====================== 4. 输出结果并保存图片 ======================
fprintf('==================== 拟合结果 ====================\n');
fprintf('半波电压 U_  = %.2f V\n', Upi_fit);
fprintf('光强振幅 A = %.2f mW\n', A_fit);
fprintf('电压偏移 U0 = %.2f V\n', U0_fit);
fprintf('背景光强 I0 = %.3f mW\n', I0_fit);
fprintf('决定系数 R² = %.4f\n', R2);
fprintf('极值法半波电压 U_  = %.0f V (|%.0f - %.0f|)\n', abs(U_max-U_min), U_max, U_min);
fprintf('==================================================\n');

% 保存高清图片（300dpi，适合插入LaTeX）
%print(gcf, '电光调制I-V曲线', '-djpeg', '-r300');
```