

ZKY-CDG
晶体电光效应实验仪
实验指导及操作说明书

四川世纪中科光电技术有限公司

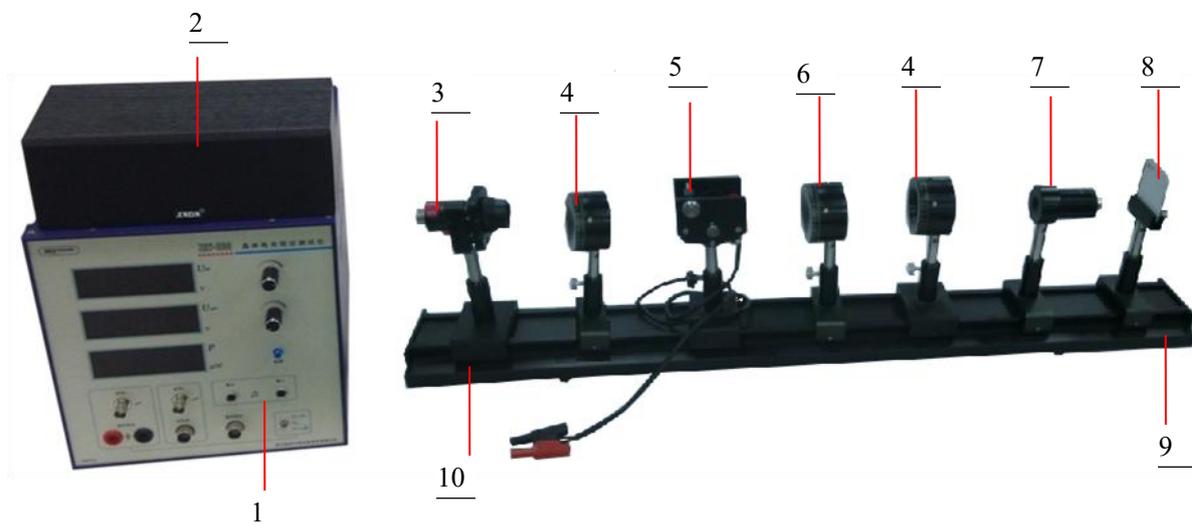
地址：四川省成都市经济技术开发区(龙泉驿区)南二路 309 号 邮编：610100

电话：(028) 61430706 61430729 网址：WWW.ZKY.CN E-mail: ZKY@ZKY.Cn

2018-10-09

晶体电光效应实验

仪器清单



包含器件	数量
1. CDG_晶体电光效应测试仪主机	1
2. 双声道音箱	1
3. 半导体激光器组件	1
4. 偏光镜组件	2
5. LN 晶体盒	1
6. 波片镜组件	1
7. 光功率接收组件	1
8. 准直屏组件	1
9. 导轨装置	1
10. 滑块调节装置	7

图片仅作参考，最终请以实物为准。

线材及其他	数量
电源线	1
电源适配器 5V (音箱用)	1
音频线	1
Q9 信号线	2
三芯航空插头线	1
四芯航空插头线	1

半导体激光器组件的组成	数量
11. 二维调节组件	1
12. 光阑筒组件	1



实验背景

激光具有极好相干性，与无线电波一样易于调制，且其频带宽、能量传递信息容量大，发散角小、光能集中，使其成为当今远距离信息传递的一种理想光源。

激光调制就是将需要传递的信息加载在激光上的过程(为完成这一过程而设计的器件就是调制器)；相反的，解调就是到达目的地后，从激光中分离出原信号的过程。调制的工作原理主要是基于电光、声光、磁光等各种物理效应，实现对激光的幅度、相位、频率等的改变，以完成信息加载。

电光效应，简单地说就是介质在外加电场的作用下，折射率发生变化的现象。本实验即是折射率变化从而导致激光幅度的变化。虽然电场引起的折射率变化很小，但可用干涉等方法精确地显示或测量。根据电光效应制成的光学器件，对于电场变化的响应速度很快，因此可以用来制作电控光开关，在高速摄影、激光通讯方面很有用处。由电光效应制成的电光调制器是目前高速光通信中应用十分广泛的一类器件，现有技术工艺已经很成熟，能够制成尺寸很小，调制电压几伏的调制器。

根据施加电场方向，电光调制方法分为两种：一种是纵向调制，所加电场和通光方向平行；一种是横向调制，所加电场和通光方向垂直。本套晶体电光实验仪，我们进行的是铌酸锂(LiNbO₃)晶体的一次电光横向强度调制实验。通过实验可以使学生对偏振光干涉、电场光场相互作用等物理知识的了解，也能加深对激光通信中的调制与解调等内容的认识。

实验目的

1. 学习并掌握晶体电光调制的实验原理及实验方法；
2. 观察晶体加电压前后锥光干涉图像，理解偏光干涉；
3. 学会使用极值法和调制法测量半波电压；
4. 使用 1/4 波片进行电光调制；
5. 加载音频信号，进行光通信演示。

实验原理

1. 晶体的一次电光效应

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 ϵ ，由于折射率 n 和介电常数是相关的，因此外加电场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 ($\sim 10^8\text{V/cm}$)，因此可以将折射率按照外电场 E 展开， $n(E)$ 可以写为：

$$n = n_0 + aE + bE^2 + \dots \quad (1)$$

其中 n_0 是无电场存在时的折射率， a 、 b 为常数。由一次项 aE 引起的变化称为一次电光效应（线性电光效应），历史上由 Pockels 于 1893 年发现；由二次项 bE^2 引起的变化称为二次电光效应（平方电光效应），历史上由 Kerr 于 1875 年发现。一次电光效应只存在于不具备对称中心的晶体中，而二次电光效应存在于任何物质中（在某些液体中会比较显著）。一次效应较二次效应显著得多，本实验旨在研究一次效应，忽略二次效应。

对于一般的晶体而言，由于其本身存在各向异性以及一定的对称结构，通常用折射率椭球方程来描述折射率与光的传播方向、振动方向的关系，折射率椭球方程的一般结构为：

$$\sum_{i,j} \frac{1}{n_{ij}^2} x_i x_j = 1 \quad (i,j=1,2,3) \quad (2)$$

此时的式(1)，将需要使用张量描述。就最终结果而言：外加电场的存在将导致折射率椭球的旋转以及变形，从而影响光在晶体中的传播。

2. 铌酸锂(LiNbO₃)晶体的一次电光效应

实验使用铌酸锂(LiNbO₃)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:

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

其中 n_o 和 n_e 分别为单轴晶体的寻常光 o 和非寻常光 e 的主折射率。实验中采用横向电光调制,入射光方向沿晶体光轴方向(z 轴),电场 E 与 x 轴方向平行。具体见图 1

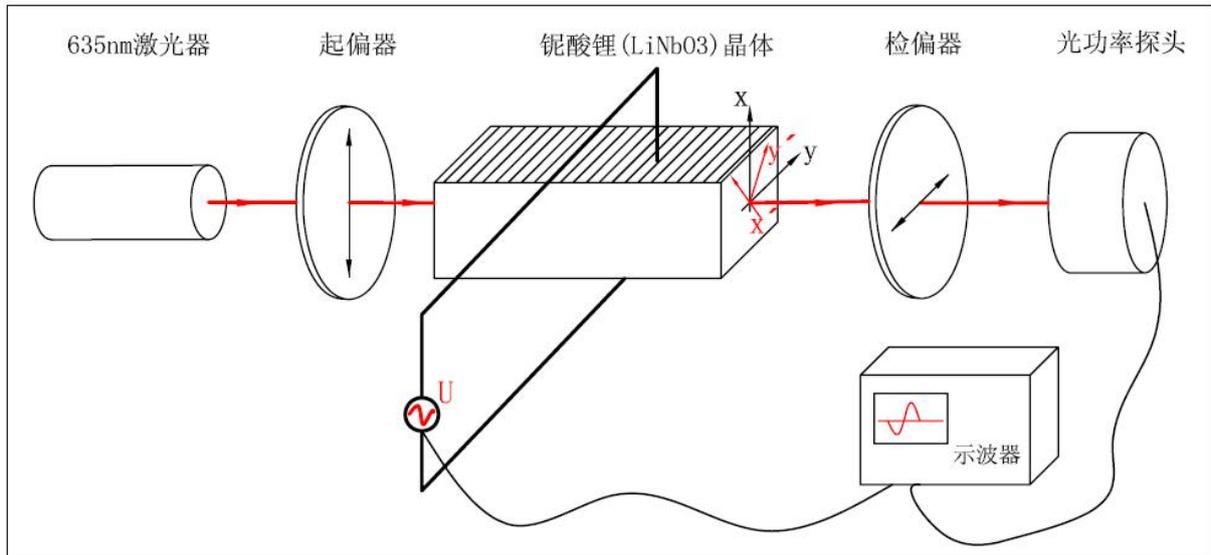


图 1 横向电光效应原理示意图

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,因此我们只需要考虑 $z=0$ 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° , 新的主轴坐标中折射率椭球方程为:

$$\left(\frac{1}{\frac{1}{n_o^2} - \gamma_{22}E} \right) x'^2 + \left(\frac{1}{\frac{1}{n_o^2} + \gamma_{22}E} \right) y'^2 = 1 \quad (z=0)$$

此时新的感应主折射率可以化简为(当 $x \ll 1$ 时,泰勒级数展开 $(1+x)^n \approx 1+nx$)

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

式中 γ_{22} 为电光系数。因此总的来说:加电场后, $LiNbO_3$ 晶体变为双轴晶体,其折射率椭球发生改变,在 $z=0$ 的平面内,原折射率椭球的截面由半径为 n_o 的圆变为长短半轴为 $n_{x'}$ 和 $n_{y'}$ 的椭圆,椭圆长短轴方向 x' 、 y' 相对于原 x 、 y 轴旋转了 45° , 同时椭圆长短半轴的变化量与外加电场成正比。

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 Φ 。当晶体长为 L , 厚为 d , 所加电压为 U 时, 相位差 Φ 为

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

当相差相位为 π 时,相应的电压值称为半波电压 U_π , 它是电光调制的重要参数。由以上式简化后,可以将 $LiNbO_3$ 晶体的半波电压和相应的相位差表示为:

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

$$\Phi(U) = \frac{\pi}{U_{\pi}} U - \Phi_0 \quad (4)$$

令 $\Phi_0 = \pi U_0 / U_{\pi}$ ，则上式变为

$$\Phi(U) = \frac{\pi}{U_{\pi}} (U - U_0) \quad (4.1)$$

式中加入 Φ_0 或 U_0 主要是考虑晶体生长的不均匀性以及切割的精度等问题，对于加工良好的纯净晶体，且光路正确时 $\Phi_0 = 0$ (或 $U_0 = 0$)。由式(4)可以看出，通过调节晶体尺寸的比值 d/L 可以实现对半波电压的调节。

3. 电光强度调制

根据图 1，当加上电场后，晶体就相当于一个厚度为 L 产生相位差为 Φ 的波片，其主轴为互相垂直的 x' 和 y' 。当激光经过起偏器（偏振方向 P ）后成为线偏振光，其在晶体中被分解为沿 x' 和 y' 方向存在相差为 Φ 的两束偏振光，最终在检偏器（偏振方向 A ）上发生偏光干涉，具体可见图 2：

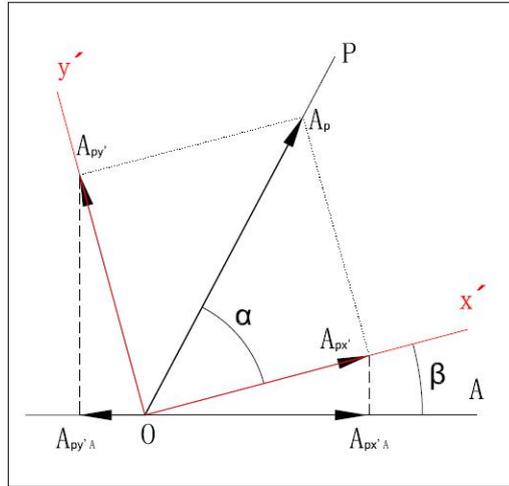


图 2 电光调制下的偏振光的合成和分解

根据偏光干涉的原理可以得到经过检偏器 A 后的光强 I_A 为：

$$I_A = A_p^2 \left\{ \cos^2(\alpha + \beta) + \frac{1}{2} \sin 2\alpha \sin 2\beta (1 - \cos\Phi) \right\}$$

式中 A_p 为光束经起偏器 P 后的振幅， α 为 x' 与起偏器 P 偏振轴夹角， β 为 x' 与检偏器 A 偏振轴夹角。当 PA 正交 ($\alpha + \beta = 90^\circ$) 时，上式变为：

$$I_A = \frac{1}{2} I_p \sin^2 2\alpha [1 - \cos\Phi(U)]$$

式中 I_p 为光束经起偏器 P 后的光强。

当 $\alpha = 45^\circ$ 时 (即两偏振片 P 、 A 分别平行于晶体 x 、 y 轴时)， I_A 幅度最大，即是电压 U 对光强 I_A 的调制作用最大，此时

$$I_A = \frac{1}{2} I_p \left(1 - \cos \frac{\pi}{U_{\pi}} (U - U_0) \right) \quad (5)$$

(1). 直流偏置特性

实验中当我们满足光束平行于 z 轴， $\alpha = \beta = 45^\circ$ ，晶体两个 x 面上施加直流偏置电压 U 时，根据式(5)，我们可以得到图 3 所示的 $I_A \sim U$ 曲线，也就是说可以通过式(5)实现强度调制：调节直流偏置 U 的大小从而改变光强输出 I_A 。

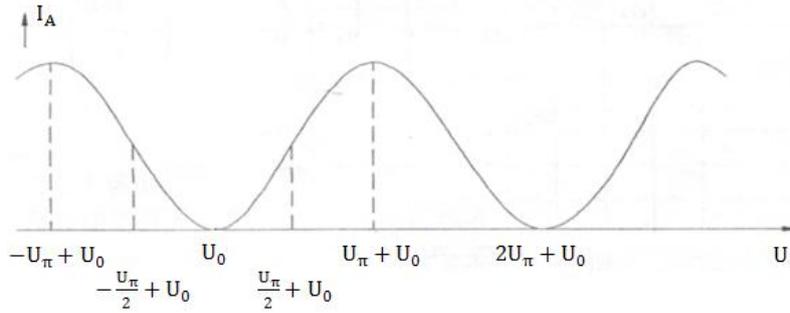


图 3 直流偏置下的 $I_A \sim U$ 曲线

从式(5)或图 3 可见，当 U 在 $U_0 + (2k+1)U_\pi/2$ ($k = \pm 0, 1, 2, 3$) 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。

(2). 正弦信号的电光调制

当在 LiNbO_3 晶体上除去加一直流偏置电压 U_0 产生 Φ_D 的相差外，同时加上一个正弦调制信号时

$$U = U_D + U_m \sin \omega t \quad (U_m \ll U_D)$$

①当 $U_0 = U_0 + (2k+1)U_\pi/2$ ($k = \pm 0, 1, 2, 3$) 时，将上式代入式(5)后，简化后有

$$I_A = \frac{1}{2} I_p \left\{ 1 + (-1)^k \sin \left(\frac{U_m}{U_\pi} \pi \sin \omega t \right) \right\}$$

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

(6)

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，电光调制器一般工作在这个状态，如图 4(a)，其中 $(-1)^k$ 代表的是相位，即相邻线性电压间波形反相。

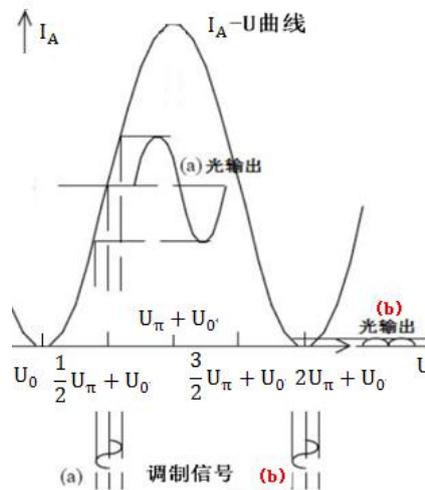


图 4 正弦信号调制示意图

②当 $U_0 = U_0 + kU_\pi$ ($k = \pm 0, 1, 2, 3$) 时，代入(5)后，简化后有

$$I_A = \frac{1}{2} I_i \left\{ 1 + (-1)^{k+1} \cos \left(\frac{U_m}{U_\pi} \pi \sin \omega t \right) \right\}$$

$$\cong \frac{1}{2} I_i \left\{ 1 + \frac{1}{2} (-1)^{k+1} \left[1 - \left(\frac{U_m}{U_\pi} \pi \right)^2 \sin^2 \omega t \right] \right\} \quad k=0, 1, 2, 3 \dots \quad (7)$$

由于 $\sin^2 \omega t$ 频率是 $\sin \omega t$ 的两倍，也就是输出频率是调制信号频率的两倍，产生了“倍频”失真，如图 4 (b)，其中 $(-1)^{k+1}$ 代表的是相位，即相邻倍频电压间波形反相。

③当在晶体上加任意的音频信号时，根据傅里叶分析法，音频信号可以看成多个正弦信号的叠加，因此上述原理与规律仍然成立，这也就是使用电光效应的激光音频通信的原理。

4. 用 1/4 波片进行电光调制

对于一块很薄的单轴晶体，若其光轴平行于表面，当一束单色光垂直入射在其表面上时，则将分解为 o 光和 e 光。由于两者在晶体内折射率不同，在射出波片后将产生固定的相位差。当晶体的厚度 L 使相位差满足以下关系：

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda}(n_o - n_e)L = \pm (2k + 1)\frac{\lambda}{4} \quad k = 0,1,2,3\dots$$

则称其为 1/4 波片，根据 k 值的不同又分为零级波片(k=0)、低级波片(1≤k≤6)和多级波片(6≤k≤12)。在晶体的交流调制中，可以用 1/4 波片代替直流偏置电压来选择工作点，从而实现信号的线性调制。下面开始说明使用 1/4 波片进行电光调制的原理，具体结构见图 5。

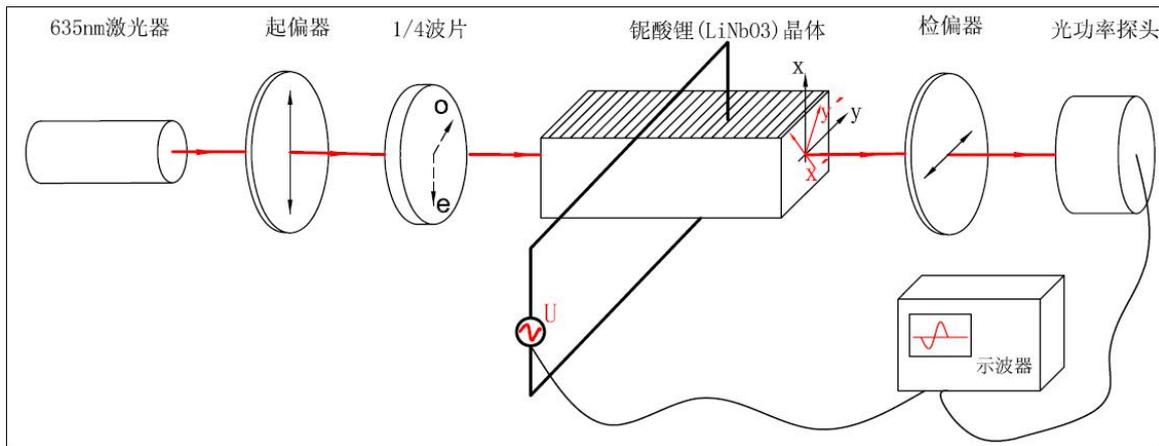


图 5 使用 1/4 波片的电光调制原理图

LiNbO₃ 晶体产生相位差为 Φ 由公式 (4) 决定，另外为方便计算说明，假设两偏振器的偏振方向和晶体 x、y 轴平行，1/4 波片的 e 轴与晶体的 y 轴呈 θ 角。这样各个光矢投影关系如下图 6

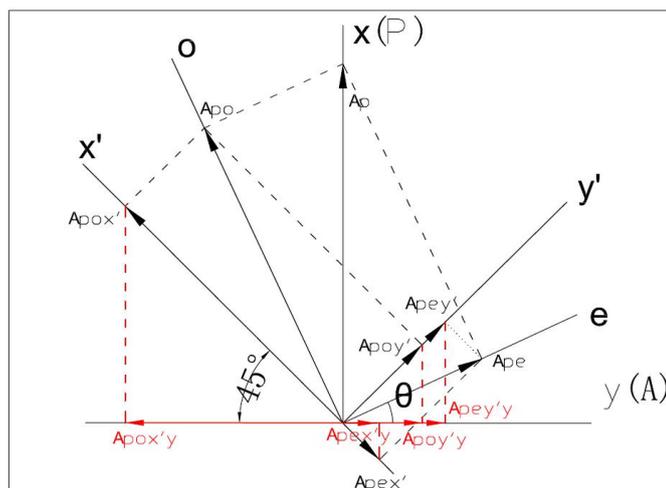


图 6 使用 1/4 波片的电光调制光矢图

根据偏振光的合成与分解，最终通过检偏器 A 的偏振方向 y 输出的光强为：

$$I_A = \frac{1}{2}I_p(1 + \sin 2\theta \sin \Phi - \cos^2 2\theta \cos \Phi) \quad (8)$$

1) 当 θ=0 或 θ=π/2 时，上式(16)可以写为：

$$I_A = I_p \sin^2 \frac{\Phi}{2}$$

据公式(4)，在晶体上加上直流偏置和交流调制信号 $U=U_0+U_m \sin \omega t$ 后，当 $U_m \ll U_\pi$ 时上式可简化为：

$$I_A = \frac{1}{4} I_p \left(\frac{\pi U_m}{U_\pi} \right)^2 \sin^2 \omega t \quad (9)$$

和式(7)一样，这里输出频率是输入频率的两倍，属于倍频失真，但同时根据该式可以发现相邻的倍频角度之间波形是同相的。

2) 当 $\theta = \pi/4$ 或 $\theta = 3\pi/4$ 时，式(16)可以写为：

$$I_A = I_p (1 \pm \sin \Phi)$$

根据公式(4)，在晶体上加上直流偏置和交流调制信号 $U=U_0+U_m \sin \omega t$ 后，当 $U_m \ll U_\pi$ 时上式可简化为：

$$I_A = \frac{1}{2} I_p \left(1 \pm \frac{\pi U_m}{U_\pi} \sin \omega t \right) \quad (10)$$

和式(6)一样，输入输出频率一致，属于线性调制，其中±号代表的是相位，即相邻线性角度点间波形反相。

这样，总的来说，当我们使用 1/4 波片进行电光调制时，在 $U=U_0+U_m \sin \omega t$ ($U_m \ll U_\pi$) 的前提下，波片旋转一周将出现：

- 4 次倍频失真，相邻角度差为 90° ，此时 1/4 波片的主轴(o 轴和 e 轴)与电光晶体主轴(x 和 y)平行；
- 4 次线性调制，相邻角度差也为 90° ，此时 1/4 波片的主轴(o 轴和 e 轴)与电光晶体感应主轴(x' 和 y')平行。
- 值得说明的是当 $U_0 \neq 0$ 时，根据公式(8)进行模拟，只加交流调制信号 $U=U_m \sin \omega t$ ，相邻的倍频角度并不是 90° ，必须先提供一个直流偏置 $U_D=U_0$ (或者 $U_D=U_0+kU_\pi$) 时才会是 90° 。

5. 电光调制器在光通信中的应用

由电光效应制成的电光调制器，其物理尺寸现在可以做到很小，相应的由(4)式得到半波电压可以设计得很低。这里以美国 THORLABS 公司的 LN63S-FC 强度调制器进行说明。该调制器采用的是马赫-曾德尔干涉仪结构，从图 7 (b) 中可见，输入光通过光纤耦合器分为对称两路，光波导使用 LiNbO_3 晶体材料制成，其中上臂可以施加调制信号电压，改变其折射率，从而到达输出端的耦合器时，两路光存在一定的相位差，在耦合器处发生干涉时，干涉的强度由调制电压引起相位差决定。最后的调制曲线图 7 (c)，与我们前面得到的调制曲线图 3. 是相似的，当波长为 1605nm 时，其半波电压约为 8V。不过为方便物理原理性的展示，本实验仍然采用非光纤的开放式光路结构。

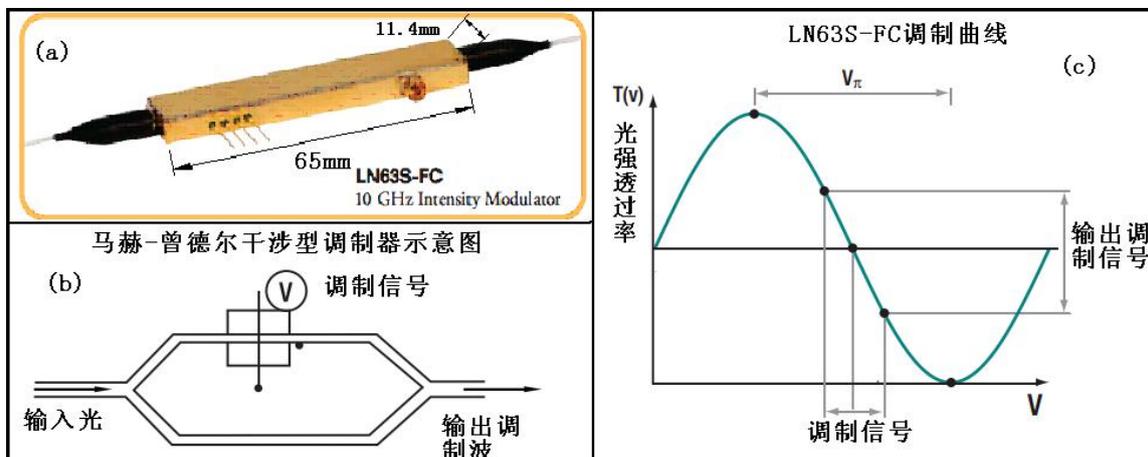


图 7 LN63S-FC 电光强度调制器

仪器介绍

1. 测试仪主机面板如下：

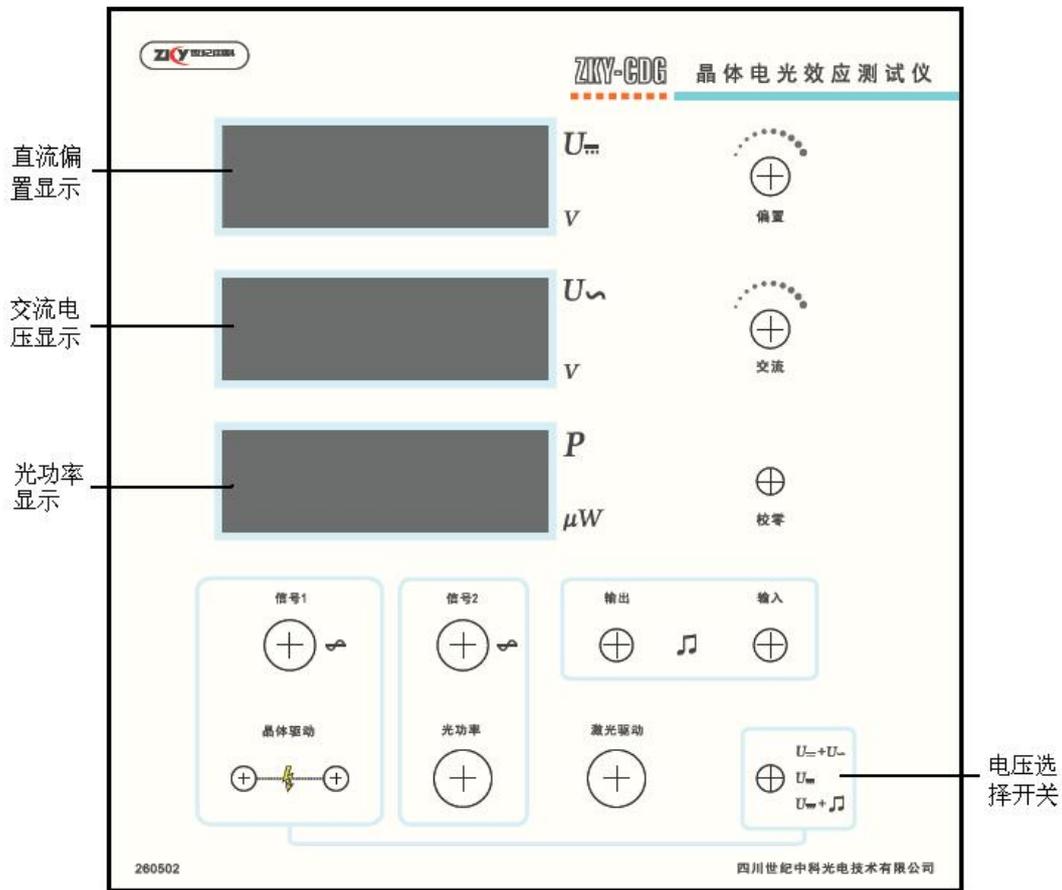


图 8 测试仪主机面板介

a. 测试仪显示部分包含以下三个部分：

直流偏置显示：显示范围 $0\sim 800V$ 范围的直流偏置电压，分辨率 $1V$ ；

交流电压显示：显示提供的 $1kHz$ 正弦交流电压，峰峰值显示范围 $0\sim 100V$ ，分辨率 $1V$ ；

光功率显示：显示范围 $-99.9\sim 200\mu W$ ，分辨率 $0.1\mu W$ ；

b. 旋钮、按键与选择开关部分

“偏置”调节旋钮：用于调节晶体直流偏置的大小；

“交流”调节旋钮：用于调节晶体交流偏压的大小；

“校零”按键：用于光功率显示表头的读数校零；

电压选择开关

- $U_{DC}+U_{AC}$ ：晶体上电压是直流偏置电压和交流调制电压的叠加
- U_{DC} ：晶体上只存在相应的直流偏置电压
- $U_{DC}+ \text{音频}$ ：晶体上电压是直流偏置电压和音频信号对应电压的叠加

c. 线缆接口部分

“信号 1”：使用 Q9 信号线连接示波器，对应显示的是晶体上驱动信号的电压波形；

“信号 2”：使用 Q9 信号线连接示波器，对应显示的是光功率接收组件的光信号波形；

- “输出”：使用音箱自带的 3.5mm 音频插头与外置音箱连接，发出声音；
- “输入”：使用专用的 3.5mm 音频线连接手机等电子设备，输入音频信号；
- “晶体驱动”：使用两根耐高压线连接晶体，为 LiNbO_3 晶体提供外置电场；
- “光功率”：使用三芯航空插头线连接光功率接收组件，将光信号输入主机；
- “激光驱动”：使用四芯航空插头线连接半导体激光器组件，为激光器供电。

2. 实验装置部分

实验装置图片参考第一页**仪器清单**部分，下面就其各部分参数介绍如下：

- a. 半导体激光器组件(编号 3)：点状半导体激光器 635nm，可调焦。由二维调节组件（编号 11）和光阑筒组件（编号 12）组成，安装前请按照**附录 1**调整激光器光束与偏振方向。
- b. 偏光镜组件（编号 4）：作为起偏器/检偏器使用，主要分为动环和定环两部分。动环上充满表示角度的刻线，分辨率为 2° ，其中 $\Phi 35\text{mm}$ 的玻璃线偏振片安装在动环上，偏振方向已经对齐“0 刻度”；定环上存在两根白色刻线，用于确定偏振片的偏振方向。
- c. LN 晶体盒组件（编号 5）： LiNbO_3 晶体尺寸为 $4 \times 2.5 \times 30(\text{mm})$ ，切割方式为 z 切，镀金电极面为 $4 \times 30(\text{mm})$ ，折射率 $n_0=2.286$ 。该晶体安装在一个二维调节架上，其内有一“毛玻璃”，用于进行锥光干涉图的测试，可通过“3.毛玻璃位置调节旋钮”选择是否使用毛玻璃进行实验。另可通过“1.晶体俯仰调节旋钮”、“2.晶体水平调节旋钮”以及通过调节升降杆的高度和角度对晶体进行多维调节。具体见图 9

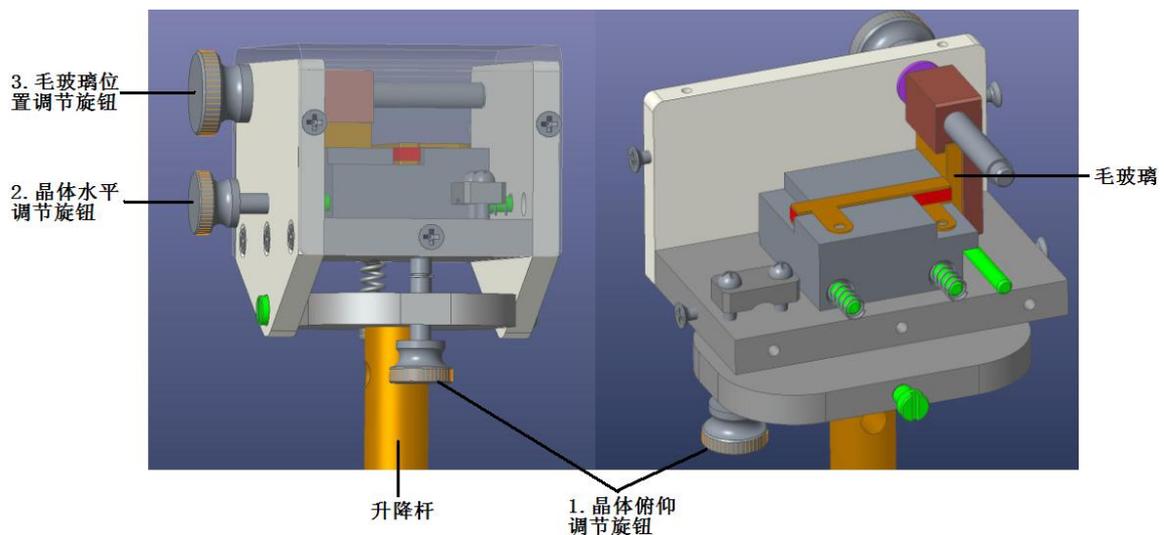


图 9 LN 晶体盒组件结构与调节

- d. 波片镜组件（编号 6）：主要分为动环和定环两部分。动环上充满表示角度的刻线，分辨率为 2° ，其中 $\Phi 10\text{mm}$ 的 $1/4$ 波片安装在动环上，波片采用的是性能更好的石英低级波片，对应波长为 632.8nm ；定环上存在两根白色刻线，用于确定 $1/4$ 波片的方向。
- e. 光功率接收组件（编号 7）：该组件使用硅光电池作为传感器，使用三芯航空插头线连接测试仪主机，另外该传感器前有一片中性减光片，因此测试的功率值是衰减后的数值。
- f. 准直屏组件（编号 8）：为带网格白屏，用于光路调节以及作为实验中锥光干涉图的观察。
- g. 双声道音箱（编号 2）：该音箱需外接 5V 电源适配器，使用其自带的 3.5mm 音频插头连接测试仪主机，另外自带功放，可调节音量大小。

实验内容与步骤

实验操作前的说明：

- a. 实验前请认真阅读说明书预习后再进行实验；
- b. 在安装各个光学件的过程中请保证锁紧旋钮一方背离导轨标尺方向，以方便调整各个机械中心共线；
- c. 实验中对于干涉图和波形的描述，条件许可的话尽量使用图片记录；
- d. 实验前请先使用“校零”按键将光功率校零；
- e. 实验前请先按照仪器介绍连接好各个器件（暂不连接外置音箱和音频输入的电子器件），电压选择开关置“ $U_{=}$ ”档位后再开启电源，同时使用“偏置”和“交流”调节旋钮确保晶体上无电压存在（或者拔掉晶体线缆），最后预热 10min 左右；
- f. 实验前在预热过程中，请确认激光光束是否平行出射，若不平行请取下激光器前的光阑罩，用一字改刀，调整激光聚焦透镜，调整好后将光阑罩安装好。

1. 光路调节

- 1) 将激光器组件固定在导轨头部，同时放上准直屏，选择一个合适的安装高度，通过调整激光器的两个维度调节旋钮，使准直屏在拉近拉远过程中，屏上光斑位置基本不变，此时光束平行导轨，然后固定激光器，后续不再变动。
- 2) 在激光器和准直屏之间依次放上起偏器和检偏器，首先将二者与激光器大致调整到等高同轴，接着将起偏器动环上的“ 90° 刻线”对齐定环上的白色刻线并锁紧旋转方向，然后旋转检偏器动环，使屏上光斑最弱，最后锁紧检偏器旋转方向，并记下检偏器角度。
- 3) 将 LiNbO_3 晶体放在两偏振器之间，适当调节各件在导轨上的位置，使起偏器和晶体之间至少可以再放入两个光学元件，毛玻璃所在一侧指向激光器，且旋转“毛玻璃位置调节旋钮”使其不遮挡光路。
- 4) 通过调整升降杆和两个维度旋钮（“晶体俯仰调节旋钮”和“晶体水平调节旋钮”）使光束从晶体中心通过，同时使其入射面反射光与激光器光阑孔基本重合，此时晶体位置粗调完成（粗调完成后，升降杆不需锁得台紧，以方便微调时旋转升降杆）。
- 5) 将检偏器和准直屏移到靠近 LiNbO_3 晶体（其中检偏器尽量靠近但不影响晶体，白屏位置以调整到实验者从侧面刚好能够看到整个白屏为佳），锁紧后此时会在屏上存在一个光斑，根据屏上网格的相对位置，记住该光斑的位置；
- 6) 调节晶体盒上的“毛玻璃位置调节旋钮”，使毛玻璃遮挡住晶体，此时屏上会出现单轴晶体的锥光干涉图，微调升降杆和两个维度旋钮，使该图对称中心和步骤(5)中的光斑位置重合，并锁紧升降杆；
- 7) 旋开毛玻璃，使其不遮挡光路，此时光路调节基本完成。

2. 单轴、双轴晶体的会聚光的锥光干涉图的观测

- 1) 在步骤 1. 中光路调节好以后，重新调节晶体盒上的毛玻璃位置旋钮，使毛玻璃遮挡住晶体，观察准直屏上单轴晶体的锥光干涉图，并就其形状和明暗分布进行描述说明；
- 2) 旋转检偏器 90° ，此时起偏器检偏器偏振方向相同，观察屏上干涉图形状和明暗分布；
- 3) 将检偏器角度调回原角度，调节“偏置”旋钮改变晶体上的直流电压（“ $U_{=}$ ”档），此时干涉图将变为双轴晶体的锥光干涉图，观察其形状和明暗分布，逐渐改变直流偏置大小，观察干涉图样的变化。

3. 极值法测试直流偏置下的光输出特性，得到半波电压

- 1) 各个光学件在步骤 2. 的基础上，旋开毛玻璃，使其不遮挡光路，将准直屏拉远，在屏与检

偏器之间放上光功率接收组件；

- 2) 电压档位选择 U_{∞} ，调节“偏置”旋钮使直流电压为 400V 左右不变，调整光功率接收组件的高度和方向，使接收到的光功率最大，然后在此位置固定；
- 3) 从 0V 开始调整直流偏置电压的大小，记录各个电压和对应的光功率于表 1（对于极值点附近可根据实验情况增减测试间隔，更多取样）

直流偏置电压/V	0	20	40	60	……	800
光功率 P/ μ W						

表 1 直流偏置下的输出特性表

- 4) 测试完成后以直流偏置电压 U 为横轴，光功率 P 为纵轴作图，由此得到 U_0 和半波电压 U_{π} ，并根据实验原理的介绍大致预测晶体的线性工作电压点。

4. 电光晶体的交流调制与半波电压的测试

- 1) 各个光学元件保持和步骤 3. 中一致，测试仪主机选择 $U_{\infty}+U_{\sim}$ 档位，旋转“交流”旋钮，使交流信号不为 0（建议调节到 65V 以上）；
- 2) 示波器 CH1 和 CH2 通道分别接测试仪主机“信号 1”和“信号 2”，根据信号的强度和频率选择合适的示波器档位；
- 3) 从 0V 开始调整直流偏置电压的大小，观察 CH2 通道光功率信号的波形、周期和相位相对于 CH1 通道波形的变化，记录依次出现的倍频失真时的直流偏置大小，同时观察并描述各个直流偏置下的光功率信号的失真情况，特别是直流偏置处于步骤 3. 中得到的线性工作电压附近的光输出波形；
- 4) 根据步骤 3) 中的倍频点的位置，得到晶体的 U_0 和半波电压 U_{π} 。

5. 通过半波电压计算电光系数 γ_{22}

- 1) 对比实验步骤 3. 和 4. 中两种测试半波电压方法的优缺点；
- 2) 由测试所得半波电压和公式 (4)，计算电光系数 γ_{22} ，并计算两种测试方法的相对偏差。

6. 使用 1/4 波片进行电光调制

- 1) 各个光学元件与仪器间连线保持和步骤 4. 中一致，测试仪主机选择 $U_{\infty}+U_{\sim}$ 档位，在两偏振器之间放上波片镜组件；
- 2) 直流偏置取 0V，旋转 1/4 波片，记录出现的倍频失真时的角度，计算相邻角度的差值；
- 3) 直流偏置取实验步骤 4. 中得到的 U_0+kU_{π} ，旋转 1/4 波片，记录出现的倍频失真时的角度，计算相邻角度的差值；
- 4) 根据实验原理，解释步骤 2) 和 3) 中出现差异的原因；
- 5) 直流偏置再次取 U_0+kU_{π} ，旋转 1/4 波片，观察记录不同角度下的光功率信号的波形、周期和相位的对应变化，特别是步骤 3) 中的倍频角度和距离倍频角度 45° 差值位置的情况。

7. 利用 LiNbO_3 晶体的电光效应，实现音频信号的光通信演示

- 1) 各个光学件和仪器间连线保持与步骤 4. 中一致（或在步骤 6. 的基础上取下 1/4 波片），测试仪主机选择 $U_{\infty}+\text{音乐}$ 档位；
音箱接 5V 电源适配器，并使其音频插头与测试仪主机的“输出”口连接；
使用专用的 3.5mm 音频线连接好主机的“输入”和手机等可输入音频信号的设备。
- 2) 调整直流偏置的大小，监听各个电压下音箱输出的声音情况（特别是前面测试得到的各个倍频点和线性工作点），结合示波器波形进行分析；
- 3) 在 LiNbO_3 晶体和起偏器之间再次放上 1/4 波片，直流偏置设置为 U_0+kU_{π} ，旋转 1/4 波片，

监听各个角度下音箱输出的声音情况（特别是前面测试得到的各个倍频角度和线性工作角度），结合示波器波形进行分析。

注：该步骤中请根据实际情况调节手机等音频设备上的输入音量，或通过调节外置音箱上音量旋钮调节输出音量。

注意事项

1. 实验中晶体上是高压信号，请不要随意碰触、拆解晶体盒，或者接触主机“晶体驱动”接线口；
2. 实验中为保证测试的准确稳定，请避免实验平台大的震动；
3. 由于半导体激光器输出的是偏振光，在实验前调节好其偏振方向后，实验中请不要再随意旋转或拆解（否则可能会导致干涉光斑太暗或者光功率读数太低，此时请根据附录 1.重新调节激光偏振方向）；
4. 实验中的光功率组件是用硅光电池和衰减片组成，测试数据是 635nm 波长光线衰减后的读数，当测试其他波长时，需要考虑硅光电池的光谱响应和衰减片的衰减系数；
5. 各个光学组件取下导轨后，请躺放，防止栽倒损坏相应的光学元件；
6. 测试完成后请使用包装袋将各个光学件罩上，防止灰尘对光学件的损伤。

附录 1. 半导体激光器偏振方向与安装说明

实验所用光源为 635nm 半导体激光器，其光输出是偏振光，为保证得到较明显的锥光干涉图以及较大的光强输出，需要在仪器安装或初次使用时调整其偏振方向。

一. 所需工具：

偏光镜组件（起偏器或检偏器，偏振方向已对齐动环 0 度位置）、导轨、准直屏组件，一字改刀、十字改刀、内六角扳手、CDG 电光效应测试仪主机。

二. 安装说明：

1. 将光阑筒组件安装在二维调节架上（暂不安装光阑罩），固定螺钉暂不锁紧；
2. 将二维调节架、准直屏放置在导轨上，使用相应线材连接激光器与测试仪主机“激光驱动”接口，打开电源点亮激光器，使用一字改刀调节激光器的光输出扩散角，使出射光平行出射（随白纸的远近移动，纸上光斑大小基本不变），然后旋上光阑罩；
3. 在二维调节架和准直屏之间放上一个起偏器(或检偏器)，大致保证各元件等高同轴。且使动环 0 刻度对齐定环上的白色刻线，具体光路如下图 10：

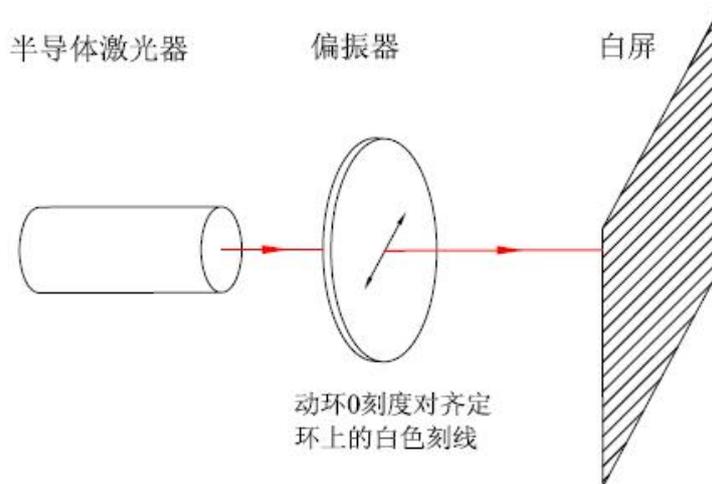


图 10 半导体激光器偏振方向调节光路图

4. 旋转二维调节架内的激光器光阑筒组件，使准直屏组件上光斑最弱，在此锁紧二维调节架上的螺钉，将激光套筒固定于二维调节架上，则此时激光器的偏振方向调整完成。